ZUR ERFASSUNG DES GEOMECHANISCHEN PARAMETERS „DURCHTRENNUNGSGRAD" VON GEKLÜFTETEN SEDIMENTGESTEINEN IM GELÄNDE

Dissertation
zur
Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
der
Abteilung für Geowissenschaften
an der Ruhr Universität Bochum

von
Dipl.-Geol. Stawros G. Artopoulos
aus Athen, Griechenland

Bochum 1976

ZUR ERFASSUNG DES GEOMECHANISCHEN PARAMETERS 'DURCHTRENNUNGSGRAD' VON GEKLÜFTETEN SEDIMENTGESTEINEN IM GELÄNDE

genehmigte
Dissertation
zur
Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
der
Abteilung für Geowissenschaften
an der Ruhr-Universität Bochum

von
Dipl.-Geol. Stawros G. Artopoulos
aus Athen, Griechenland

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Juli 1976
Referent: Prof. Dr.-Ing. K. W. John
1. Korreferent: Prof. Dr. R. Hoeppener
2. Korreferent: Prof. Dr.-Ing. L. Müller-Salzburg

Bochum
- 1976 -

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

V o r w o r t

Vorliegende Arbeit wurde am Institut für Geologie, Lehrstuhl Geologie III - Geotechnik, der Ruhr-Universität Bochum auf Anregung von Prof. Dr.-Ing. K. W. John durchgeführt.

Herrn Professor John danke ich für die volle Unterstützung, die ich von ihm bei meiner Tätigkeit erhalten habe sowie für die Möglichkeit, bei Planung und Durchführung meiner Untersuchungen selbständig und aus eigener Initiative arbeiten zu können. Seine kritischen Bemerkungen zu den erarbeiteten Ergebnissen in den verschiedenen Arbeitsphasen haben sehr viel zur endgültigen Fassung dieser Arbeit beigetragen.

Besonderen Dank schulde ich den Herren Prof. H. K. Kutter, Prof. B. Schröder, Dr. G. Schäfer sowie den Herren Dipl.-Geol. R. M. Spang, Dipl.-Geol. W. Rahn und Dipl.-Geol. R. Rautenstrauch, die sich mit Kritik und Anregungen an der Diskussion dieser Arbeit beteiligten. Frl. E. Teucke danke ich für ihre wertvolle Hilfe bei der kritischen Durchsicht des Manuskriptes im Hinblick auf sprachliche Unzulänglichkeiten.

Mehrere Institutsangehörige waren mir bei der Durchführung der Arbeit und der Herstellung des Manuskriptes mit Tat und Rat behilflich: Frl. K. Trapp (Manuskript) sowie die Herren A. Piechocki (Rechenprogramm), Hamann, W. Thiel und R. Walter (Zeichnungen), R. Milbradt und M. Ress (Fotographien). Bei allen diesen Mitarbeitern möchte ich mich recht herzlich bedanken.

Zusammenfassung

Der "Durchtrennungsgrad", definiert als ein Maß für das Durchstreichen der Gesteinsklüftung, ist ein wichtiger Eingangsparameter, welcher in Ingenieurberechnungen für die Ermittlung der Festigkeit und Verformbarkeit von geklüfteten Felsmassen eingesetzt wird. Während der letzten Jahre haben Erfahrungen aus der Felsbaupraxis ergeben, daß die Schwierigkeiten bei der Arbeit mit diesem felsmechanisch wichtigen, geologisch bedingten Parameter größer sind als ursprünglich erwartet werden konnte. Eine intensive Erforschung des Begriffes "Durchtrennungsgrad" ist daher nicht nur für die Theorie, sondern auch für die Praxis der Felsbaumechanik von Interesse.

Die Betrachtungen werden auf der Grundlage einer vertieften Untersuchung der geologischen Aspekte des Durchtrennungsgrades durchgeführt. Nach Diskussion der bisher gegebenen Ansätze wird festgestellt, daß eine auf die Betrachtung mechanischer Gesichtspunkte ausgerichtete geometrische Beschreibung des Durchtrennungsgrades, welche zugleich den geologischen Gegebenheiten genügen soll, nicht existiert. Nach Untersuchung der Problematik des Durchtrennungsgrades wird gezeigt, daß dieser nicht als ein vollständig erfaßbarer, exakt zu ermittelnder, sondern als ein variabler Parameter betrachtet werden muß, dessen Größe von der Ausbildung des Trennflächengefüges und vom künftigen Beanspruchungsplan maßgeblich bestimmt wird.

Ausgehend von diesen Untersuchungen und deren Ergebnissen wird ein Näherungsverfahren für geologisch eingegrenzte Sonderfälle entwickelt, mit dem Ziel, einen oberen und einen unteren Grenzwert für den "Durchtrennungsgrad" im Gelände zu bestimmen. Danach wird in geschichteten Sedimentgesteinen ein geometrisch und mechanisch bedingter oberer Grenzwert von 100 v. H. für den "Durchtrennungsgrad" angenommen. Dieser obere Grenzwert wird als repräsentativ für das gesamte Trennflächengefüge (d. h. Schichtfugen

und Klüftung) angesehen. Ein unterer Grenzwert wird in geschichteten sowie in massigen Sedimentgesteinen durch den "effektiven Durchtrennungsgrad" von einzelnen, potentiell gefährlichen Kluftscharen über die "Makrorauhigkeit" des Reliefs bestimmter Aufschlußoberflächen erfaßt.

Abschließend wird die Anwendung dieser Konzeption im Gelände anhand von zwei Beispielen gezeigt.

In Anhang A werden die zur Auswertung der eigenen Geländeaufnahmen verwendeten Rechenprogramme zusammengestellt und ihre mathematischen Grundlagen erläutert. Die vollständigen Ergebnisse der Geländeaufnahmen werden in Anhang B angegeben.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. ZIELSETZUNG DER ARBEIT UND VORGANGSWEISE	4
2.1 Zielsetzung	4
2.2 Vorgangsweise	5
3. BESTEHENDE KONZEPTIONEN ZUR ERFASSUNG DES DURCHTRENNUNGSGRADES	6
3.1 Allgemeines	6
3.2 Praxisorientierte Konzepte	7
3.2.1 Grundkonzeption nach PACHER, 1959	7
3.2.2 Verwandte Konzepte	10
3.2.2.1 Vorschlag von HERGET, 1970	10
3.2.2.2 Konzeption von HEITFELD und HESSE, 1974	12
3.2.3 "Südafrikanische" Konzeption	13
3.2.3.1 Erhebung und Aufbereitung der Eingangsdaten	14
3.2.3.2 Rechnerische Bestimmung der "Kontinuität der Klüfte"	17
3.3 Experimentelle Konzeptionen nach K. MÜLLER, 1974	21
3.3.1 Meßstreifenauszählung	21
3.3.2 Koordinatendarstellung der Materialbrücken	22
3.3.3 Verteilung der Fugenmittelpunkte	23
3.4 Spezielle Verfahren zur Erfassung der Kluftflächengrößen	24
3.4.1 LNEC (Portugal), 1966	24
3.4.2 MAHTAB et al., 1973	27
3.5 Diskussion und Folgerungen	29

4. BEDEUTUNG GEOLOGISCHER FAKTOREN FÜR DEN DURCHTRENNUNGSGRAD 30
4.1 Vorbemerkungen 30
4.2 Untersuchte Aufschlüsse 30
4.3 Zur Charakterisierung der Klüfte 33
4.4 Zur Geometrie der Trennkluftflächen 36
4.5 Schichtung 44

5. KRITISCHE BETRACHTUNGEN 46
5.1 Zu den bestehenden Konzeptionen 46
5.1.1 Definitionen 46
5.1.2 Bestimmung im Gelände 50
5.2 Zum Begriff "Durchtrennungsgrad" 52
5.2.1 Vorüberlegungen 52
5.2.2 Räumliche Geometrie des Trennflächengefüges 54
5.2.3 Bruchvorgang 55
5.3 Zusammenfassende Diskussion und Folgerungen 57

6. ZUR INGENIEURGEOLOGISCHEN ABSCHÄTZUNG DES DURCHTRENNUNGSGRADES 59
6.1 Grundsätzliche Überlegungen 59
6.2 Aufschlußbedingungen 61
6.3 Konzeption 64
6.4 Erfassung im Gelände 67
6.4.1 Ausgewählte Beispiele 67
6.4.1.1 Beispiel A 69
6.4.1.2 Beispiel B 72
6.4.2 Verfahren zur Geländeaufnahme 74
6.4.3 Verfahren zur Auswertung der Geländeaufnahmen 78
6.4.4 Grundsätzliche Ergebnisse 82

7. SCHLUSSFOLGERUNGEN 88

LITERATURVERZEICHNIS 88

ANHANG A: Mathematische Grundlagen und Programmprotokolle zur Berechnung der "Makrorauhigkeit" 101

ANHANG B: Auswertung der durchgeführten Geländeaufnahmen und Bestimmung der Makrorauhigkeitskennwerte der untersuchten Aufschlußoberflächen 141

1. Einleitung

In Theorie und Praxis der Felsmechanik herrscht heute weitgehend Übereinstimmung darüber, daß wichtige technologische Gebirgseigenschaften wie Festigkeit und Verformbarkeit umso weniger durch die ursprünglichen Materialeigenschaften des Gesteins und umso mehr durch das geologische Trennflächengefüge bestimmt werden, je stärker das Gebirge von Klüften und sonstigen vorgegebenen Gesteinstrennflächen durchtrennt ist. Wesentlicher Parameter für den beherrschenden Einfluß des Trennflächengefüges auf die mechanischen Eigenschaften eines geklüfteten Gesteinskörpers ist der "Durchtrennungsgrad", der das Verhältnis der in einer gedachten Schnittebene bzw. potentiellen Bruchfläche des Gesteins gelegenen Kluftflächen zur Gesamtschnittfläche beschreibt. Der "Durchtrennungsgrad" wird in der geomechanischen Literatur allgemein mit dem Symbol $\varkappa$ (kapa) bezeichnet. Definitionsgemäß ist dieser dimensionslos und sein Wertebereich liegt zwischen 0 und 1. Der Wert $\varkappa = 1{,}0$ bedeutet eine durchstreichende Kluftfläche. Dagegen bedeutet der Wert $\varkappa = 0$ das Fehlen von Teilkluftflächen im betrachteten Gesteinsschnitt.

Die Bedeutung des "Durchtrennungsgrades" hinsichtlich der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit vieler Bauwerke (z. B. große Untertagehohlräume, Böschungen und Talsperren) ist heute unumstritten. Nach Wissen des Verfassers wird derzeit der "Durchtrennungsgrad" in mindestens zwei in Vorbereitung befindlichen Richtlinien für Felsbauten (Int. Ges. f. Felsmech.; Deutsche Bundesbahn) und in einem Wörterbuch (Deutsche Ges. f. Erd- u. Grundbau) eingeführt.

In den meisten Problemstellungen der Felsbaupraxis beinhaltet der Wertebereich von $\varkappa$ zwischen 0,5 und 1,0 - dessen äußere Grenzen noch intuitiv im Gelände abgeschätzt werden können - den gesamten Problembereich. Der Unterschied von z.B. $\varkappa = 0{,}8$

zu $\varkappa = 1,0$, der sich weder intuitiv noch rechnerisch immer genau ermitteln läßt, kann beträchtliche technische Probleme und Kosten bedeuten. Zur Illustration dieses Aspektes sei hier das Beispiel der Talsperre Tachien (Formosa) angeführt. In Abb. 1 sind die Ergebnisse einer Parameterstudie zur Sicherung einer Felsnase (Horizontalschnitt, rechts oben), auf der das Einlaufbauwerk der Talsperre gegründet wurde, zusammengefaßt. Die Stabilität dieser Felsnase war von den Schichtflächen und von einer potentiell gefährlichen Kluftschar maßgeblich bestimmt. Im Diagramm ist die Anzahl der erforderlichen 120 Mp-Felsanker in Abhängigkeit von der "technischen Kohäsion" c_t - als Ersatzparameter für den Durchtrennungsgrad - der Kluftschar dargestellt.* Die äußeren Grenzwerte des Durchtrennungsgrades wurden durch die geologische Erkundung mit $\varkappa = 0,7$ und $\varkappa = 1,0$ festgelegt. Würde es gelingen, den Durchtrennungsgrad hinreichend genau zu bestimmen und diesen in einen Wert für "c_t" von größer als 5 Mp/m^2 umzurechnen (diesem entspricht hier etwa ein $\varkappa = 0,7$), so wären die gesamte Ankersicherung und die damit verbundenen Kosten nicht erforderlich. Aus Unsicherheit bei der genaueren Beurteilung des Durchtrennungsgrades wurde jedoch im vorliegenden Fall von der pessimistischen Annahme einer durchstreichenden Kluftschar (d. h. $\varkappa = 1,0$) und damit von vollen Kosten ausgegangen.

---

* "c_t" wird in der Felsbaumechanik definiert als die Scherfestigkeit entlang einer Trennfläche bzw. Trennflächenschar bei einer Normalspannung gleich Null.

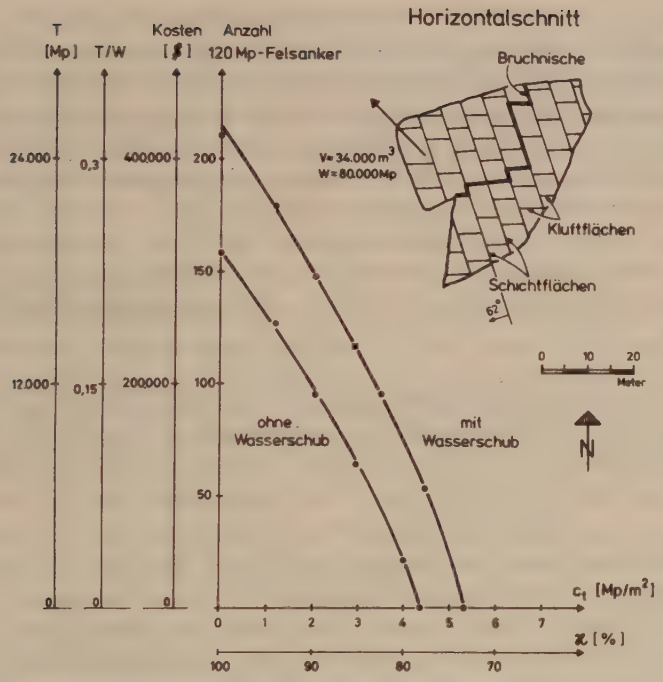


Abb. 1 Talsperre Tachien (Formosa)

Bestimmung der Anzahl der Felsanker als Funktion der technischen Kohäsion (c_t) bzw. des Durchtrennungsgrades (χ) der potentiell gefährlichen Kluftschar (für Sicherheitsgrad $\eta = 1.2$)

T = Ankerkraft

W = Gewicht des potentiellen Gleitkörpers

Während der Durchtrennungsgrad in den derzeitigen, überwiegend ingenieurmäßigen Konzeptionen als ein völlig greifbarer, weitgehend geometrischer Parameter betrachtet wird, hat sich seine Ermittlung in der Praxis auch heute noch, nach etwa 25 Jahren weltweiter Forschungs- und Veröffentlichungsaktivität auf dem Gebiet der Felsmechanik als sehr schwierig erwiesen.

Wissenschaftliche Diskussionen und Erfahrungen aus der Felsbaupraxis (L. MÜLLER, 1970; JOHN, 1974) haben ergeben, daß diese Schwierigkeiten im wesentlichen auf eine eng gefaßte Definition des Durchtrennungsgrades sowie auf eine sehr problematische Erhebung der mit seiner Ermittlung zusammenhängenden Eingangsdaten im Gelände zurückzuführen sind. Als Folge davon sind die Entwurfsberechnungen in der Felsbaupraxis hinsichtlich des Durchtrennungsgrades meist sehr konservativ, wobei beträchtliche Kosten für Sicherungsmaßnahmen, die wahrscheinlich gar nicht erforderlich wären, aufgewendet werden müssen.

Die Diskrepanz, daß einerseits der Durchtrennungsgrad in den Fachkreisen der Felsbaumechanik überwiegend als ein exakt definierbarer und völlig greifbarer, geometrischer Parameter angesehen wird, andererseits jedoch seine Ermittlung in der Praxis sehr problematisch ist, dürfte unter anderem darauf zurückzuführen sein, daß unsere Kenntnisse über die Problematik des Durchtrennungsgrades noch lückenhaft und z. T. widersprüchlich sind. Eine tiefgreifende, mehr geologisch orientierte Erforschung des Begriffes "Durchtrennungsgrad" ist deshalb geboten. Sie soll nicht nur der Theorie, sondern vielmehr auch der Praxis der Felsbaumechanik dienen.

2. ZIELSETZUNG DER ARBEIT UND VORGANGSWEISE

2.1 Zielsetzung

Das erste Ziel der vorliegenden Arbeit ist, einmal die derzeitigen Konzeptionen zur Erfassung des Durchtrennungsgrades zusammenzustellen und zu zeigen, inwieweit diese geometrisch und mechanisch sinnvoll sind und geologische Einwände gegen sie zu Unrecht bestehen, zum anderen die Problematik des Durchtrennungsgrades von geologischen, geometrischen und mechanischen Standpunkten aus zu untersuchen.

Das zweite Ziel dieser Arbeit ist die Schaffung eines ingenieurgeologischen Näherungsverfahrens, welches eine praxisorientierte Abschätzung des Durchtrennungsgrades in seiner Größenordnung für geologisch eingegrenzte Sonderfälle im Gelände ermöglichen soll.

2.2 Vorgangsweise

Die bereits dargestellten Ziele der Arbeit sollen über ein vertieftes Verständnis der geologischen Aspekte des Begriffes "Durchtrennungsgrad" in Angriff genommen werden. Dazu sind die geologischen Einflußfaktoren zu untersuchen, welche zur Definition wie auch zur Bestimmung des Durchtrennungsgrades im Gelände von Bedeutung sind.

Erst auf der Grundlage dieser Untersuchungen können sowohl die bestehenden Konzeptionen zur Erfassung des Durchtrennungsgrades und die Problematik dieses Parameters kritisch untersucht als auch ein Näherungsverfahren für die Abschätzung des Durchtrennungsgrades in geologisch definierten Sonderfällen im Gelände aufgestellt werden. In diesem Näherungsverfahren wird der Durchtrennungsgrad in Abhängigkeit von der "Makrorauhigkeit" des Reliefs bestimmter Aufschlußoberflächen erfaßt. Die Erhebung der Eingangsdaten im Gelände wird durch eine Kombination von allgemein geologischen und speziellen geodätischen Aufnahmeverfahren (Tachymetrie) durchgeführt. Die Auswertung der Geländedaten wird ohne großen Zeitaufwand mit Hilfe von bereits vorhandenen und neu entwickelten Rechenprogrammen vorgenommen .

3. BESTEHENDE KONZEPTIONEN ZUR ERFASSUNG DES DURCHTRENNUNGSGRADES

3.1 Allgemeines

Die ersten Ansätze zur Erfassung des Zerklüftungsgrades von Gesteinen gehen auf die Salzburger Schule zurück. Die Arbeiten von STINI (bei CLAR, 1939) und PACHER (1959) sollen hierbei als repräsentativ angesehen werden.

Die von STINI eingeführte Klüftigkeitsziffer k als "kurze Kennzeichnung des Grades der Zerklüftung von Gesteinen", die bestimmt ist durch die Anzahl der Kluftschnitte pro Meter einer beliebig gelegten Meßgeraden im Gesteinsaufschluß, gibt zwar die morphologische Anisotropie des Kluftflächengefüges in der Richtung der Meßgeraden an, in den verschiedenen Raumrichtungen wird sie damit jedoch nicht erfaßt. Es mußte noch der Durchtrennungsgrad als ein Maß für "Ausmaß und Verteilung gleichgerichteter Diskontinuitäten" (PACHER, 1959) beschrieben werden. Mit der Formulierung des "ebenen und räumlichen Kluftflächenanteils" von PACHER entstand die erste Konzeption für die Erfassung des Zerlegungsgrades von Gesteinen, mit welcher zunächst im mitteleuropäischen Raum gearbeitet wurde. Die Einführung der PACHER'schen Konzeption im anglo-amerikanischen Sprachraum durch JOHN (1962) hatte zur Folge, daß diese auf internationaler Ebene bekannt wurde. Dieses wird auch durch die Vielzahl der Arbeiten in weltweitem Umfang bestätigt, die seit 1962 die PACHER'sche Konzeption zur Erfassung des Durchtrennungsgrades bis zum heutigen Tage übernommen haben (s. Tab. 1, S. 28).

In der Fachliteratur stand die PACHER'sche Konzeption ohne Herausforderung, zumindest für ein Jahrzehnt - bis zum Jahre 1969 - fast einsam da. Erst seit 1969 finden sich in der Literatur Arbeiten, in denen andere Definitionen und Konzepte zur

Erfassung des Durchtrennungsgrades vorgeschlagen werden. Die überwiegende Anzahl der letzteren bauen dennoch auf die PACHER'sche Formulierung der Durchtrennungsgrade auf und stellen ihrem Aufbau nach teils geringfügige, teils weitgehende Modifikationen dar (s. Tab. 1).

Nachstehend wird auf Konzeptionen verwiesen, die den derzeitigen Kenntnisstand über die Erfassung des Durchtrennungsgrades widerspiegeln. Aus methodischen Gründen werden hierbei zwei Arten von Konzeptionen unterschieden:

a) Solche, die unmittelbaren Bezug zur Felsbaupraxis haben("Praxisorientierte Konzeptionen")

b) Solche, die die Erfassung des Durchtrennungsgrades von künstlich geklüfteten Modellsubstanzen - entweder mit vorab ausgeprägter Klüftung oder durch Versuche erzeugt - behandeln ("Experimentelle Konzeptionen").

Weiterhin werden Verfahren aufgeführt, die sich speziell mit der Erfassung von Kluftflächengrößen befassen und somit unmittelbaren Bezug zur vorliegenden Arbeit haben ("Spezielle Verfahren zur Erfassung von Kluftflächengrößen").

3.2 Praxisorientierte Konzepte

3.2.1 PACHER'sche Grundkonzeption

Nach PACHER, 1959 (auch bei L. MÜLLER, 1958 a) wird der "ebene Kluftflächenanteil" $\varkappa_e$ - auch "ebener Durchtrennungsgrad" genannt - definiert als der Flächenanteil der Kluftflächen K_i einer Schar an einer gedachten, diese enthaltenden ebenen Schnittfläche des Gesteins F (s. Abb. 2).

$$\varkappa_e = \frac{\sum K_i}{F} \qquad (1)$$

Fällt der gedachte Schnitt zwischen vorhandene Kluftflächen der Schar durch unzertrenntes Gestein, so gilt $\frac{\Sigma K_i}{F}$ bzw. $\varkappa_e = 0$. Fällt dieser dagegen mit einer durchstreichenden Kluft zusammen, dann gilt $\frac{\Sigma K_i}{F}$ bzw. $\varkappa_e = 1$.

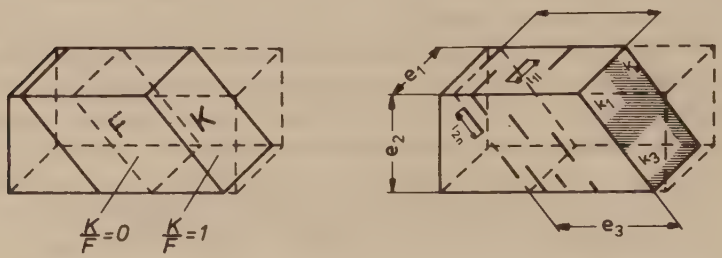


Abb.2 Definition und Bestimmung der Kluftflächenanteile nach PACHER, 1959

Der "räumliche Kluftflächenanteil" $\varkappa_r$ - auch "räumlicher Durchtrennungsgrad" genannt - wird definiert als die auf das Volumen V des betrachteten Gesteinskörpers $e_1 \cdot e_2 \cdot e_3$ (s. Abb. 2) bezogenen Flächeninhalte ΣK_i aller in diesem enthaltenen Kluftflächen der Schar

$$\varkappa_r = \frac{\sum K_i}{V} \; [m^{-1}] \qquad (2)$$

Von diesen Kluftflächenanteilen sollen der "ebene" für Ort und Richtung der zu erwartenden Bruch- bzw. Gleitfläche und der "räumliche" für die Verformbarkeit der Gesteine kennzeichnend sein (L. MÜLLER, 1958 a). Der "ebene Kluftflächenanteil" kann nicht unmittelbar, sondern nur rechnerisch, auf dem Umweg über den "räumlichen Kluftflächenanteil", erfaßt werden. Für jede Kluftschar stehen diese beiden Größen in folgender Beziehung:

$$\varkappa_r = k \cdot \varkappa_e \qquad (3)$$

wobei k die Kluftdichte (auch "Klüftigkeitsziffer" nach STINI) bzw. das Reziprok des mittleren Kluftflächenabstandes der Schar ist.

Für die Bestimmung beider Kluftflächenanteile im Gelände werden Bereiche im Gestein definiert, in denen die Klüfte "gleichgerichtet (geregelt) und gleichmäßig verteilt sind" ("Homogenbereiche"; PACHER, 1959). In zwei normal zueinander stehenden Gesteinswänden (z. B. im Steinbruch oder an Ulmen und Firsten eines Stollens) wird sowohl die Anzahl der Kluftausbisse a_1 bzw. a_2 als auch die Gesamtlänge der Kluftanschnitte Σl_1 bzw. Σl_2 gemessen. Aus

$$\frac{\sum l_1 \cdot \sum l_2}{a_1 \cdot a_2} = l_{m_1} \cdot l_{m_2} = K_m \qquad (4)$$

wird die mittlere Kluftflächengröße, K_m, ermittelt. Die Anzahl A der Kluftflächen ergibt sich aus

$$A = \frac{a_1 \cdot a_2}{g} \qquad (5)$$

wobei g die Anzahl der gemeinsamen Ausbisse an der Schnittkante ist. Der gesamte Flächeninhalt der Kluftflächen im betrachteten Bereich von den Abmessungen $e_1 \cdot e_2 \cdot e_3$ (s. Abb. 2) ergibt sich damit zu

$$\sum\sum K = A \cdot K_m \qquad (6)$$

Durch Division des somit erhaltenen gesamten Kluftflächeninhaltes durch das Volumen V des betrachteten Bereichs wird, nach Gl.(2), der räumliche Kluftflächenanteil $\varkappa_r$ berechnet.

Zur Ermittlung des ebenen Kluftflächenanteils bedarf es noch der Bestimmung des mittleren Kluftabstandes d bzw. seines Reziprokes, der Kluftdichte k. Diese ergibt sich durch Division der Anzahl der Kluftschnitte s durch die Meßlänge e_3 (s. Abb. 2)

$$k = \frac{s}{e_3} \qquad (7)$$

Aus den Gleichungen (3) und (7) wird dann der ebene Kluftflächenanteil $\varkappa_e$ ermittelt

$$\varkappa_e = \frac{\varkappa_r}{k} \qquad (8)$$

3.2.2 Verwandte Konzepte

Nachstehende Konzeptionen bauen in ihrem theoretischen Teil weitgehend auf die PACHER'sche Definition der Durchtrennungsgrade auf. Die Bestimmung im Gelände erfolgt jedoch nach Verfahren, die weitgehend von der PACHER'schen Konzeption abweichen.

3.2.2.1 Vorschlag von HERGET, 1970

Für die Bestimmung des Durchtrennungsgrades in den Lagerstätten der Mount Isa (Queensland/Australien) geht HERGET (1970) von der Definition des ebenen Durchtrennungsgrades nach PACHER aus und nennt das Verhältnis K des Flächenanteils einer Kluft an ihrer Kluftebene (diese als Schnittfläche im Gestein gedacht) "continuity ratio". Die Bestimmung im Gelände wird in Stollen mit einem Querschnitt von 10 x 10 ft. vorgenommen, welche so angesetzt sind, daß sie lediglich würfelförmige Felsblöcke von 10 x 10 x 10 ft. in jeder der vorhandenen Gesteinsarten (Tonschiefer und Quarzdolomit) de-

finieren (Abb. 3). An zwei unmittelbar angrenzenden Wänden dieser Felsblöcke (z.B. Firste und Ulmen der Stollen) wird die "Kontinuität" für jede Kluft ermittelt als das Verhältnis zwischen Ausbißlänge der Kluft zur vollen (gedachten) Schnittlänge.

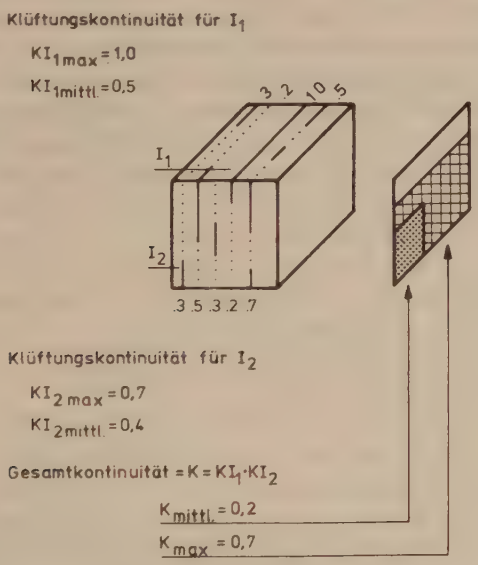


Abb.3 Bestimmung des Koeffizienten der Kontinuität K nach HERGET, 1970

Anschließend werden die Mittelwerte der Kontinuitäten der Klüfte für jede Schar in beiden Wänden des Felsblocks gebildet und miteinander multipliziert. Das somit erhaltene Produkt soll dann die mittlere Kontinuität der Schar im betrachteten Felsblock darstellen. Der Maximalwert der Kontinuität der Kluftschar wird berechnet, indem die Maximalwerte der Kontinuität der Klüfte in beiden Wänden des Felsblocks miteinander multipliziert werden (Abb. 3).

3.2.2.2 Konzeption von HEITFELD und HESSE, 1974

Zur Erfassung des "ebenen" und "räumlichen" Durchtrennungsgrades nach PACHER in der Kaverne des Pumpspeicherwerkes Waldeck II wird bei HEITFELD und HESSE, 1974 (auch bei HESSE, 1974) wie folgt vorgegangen: Die Ermittlung der Kluftflächengrößen einer Schar erfolgt in festgelegten "homogenen Bereichen" entweder durch die direkte Vermessung der Klüfte, falls diese als Flächen aufgeschlossen sind, oder durch die Multiplikation ihrer an zwei angrenzenden Kavernenwänden (z. B. Ulme und Firste der Kaverne) sichtbaren Ausbißlängen (a · b), falls diese nur als Ausbiß vorhanden sind. Für die Klüfte, die nur einen Ausbiß aufweisen, wird die Länge a des Kluftausbisses an der Kavernenwand gemessen und der Wert $\frac{a^2}{2}$ für die Flächengröße angenommen. Geht der Ausbiß über den "homogenen Bereich" hinaus, so wird dieser als $\geq a$ festgehalten und der Wert a^2 für die Flächengröße angenommen. Kluftausbisse, die kleiner als 1,0 m sind, werden hierbei zunächst nicht berücksichtigt.

Zur Festlegung eines Bezugsbereiches für die ermittelten Kluftflächengrößen wird ein zum Berginneren hin begrenzter Teilbereich betrachtet (Abb. 4). Als Tiefe T dieses Abschnitts wird die mittlere Ausbißlänge a_M der "wichtigsten Diskontinuität" (HESSE, 1974) angenommen. Die Eindringtiefe T senkrecht zur Kavernenwand ergibt sich als

$$T = a'_M = \cos\xi \cdot a_M \qquad (9)$$

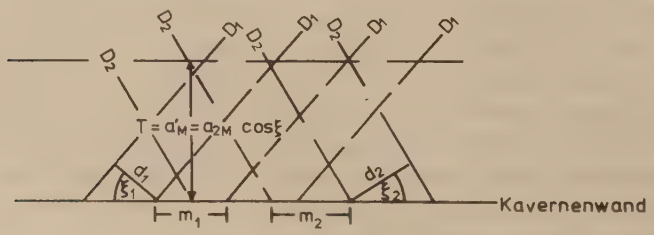


Abb. 4 Ermittlung der Eindringtiefe a'_M nach HEITFELD und HESSE, 1974

Um auf den Wert für die Eindringtiefe T zu kommen, wird die errechnete Flächensumme der Klüfte mit einem Ausbiß größer als 1,0 m mit dem Faktor M_{am} ($= \frac{T}{a_M}$) multipliziert und die "modifizierte Flächensumme" ΣF_{IA} für diese Klüfte bestimmt. Für die Ermittlung der gesamten Flächensumme der Kluftschar im betrachteten Teilbereich werden auch die Klüfte mit einem Ausbiß kleiner als 1,0 m ("Kleinklüfte") herangezogen. Für diese wird von einer mittleren Flächengröße von 0,1 m^2 ausgegangen und ihre Flächensumme errechnet. Auch diese Flächensumme wird auf die Eindringtiefe a'_M bezogen und die "modifizierte Flächensumme" ΣF_{IB} für die "Kleinklüfte" bestimmt. Aus

$$\sum\sum F_I = \sum F_{IA} + \sum F_{IB} \qquad (10)$$

wird der gesamte Kluftflächenanteil der Kluftschar im untersuchten Teilbereich ermittelt. Aus Gl. (2) und Gl. (8) (Kap. 3.2.1) werden der "ebene und räumliche Durchtrennungsgrad" nach PACHER berechnet.

3.2.3 "Südafrikanische" Konzeption

Von der Notwendigkeit ausgehend, im Hinblick auf die Anlage von möglichen Bruchflächen in Felsböschungen quantitative Aussagen über die Erstreckung der Klüfte zu machen, führte die "südafrikanische Arbeitsgruppe" (JENNINGS und ROBERTSON (1969); JENNINGS (1970 und 1972); ROBERTSON (1970); ROBERTSON und PITEAU (1970); PITEAU (1970 a, 1970b, 1972 und 1973)) den Begriff der "Klüftungskontinuität" ein. Diese wird in bezug auf mögliche Bruchflächen im Fels verstanden, und ihr Koeffizient $\varkappa$ wird als der Flächenanteil der Klüfte an einer gedachten, diese enthaltenden Bruchfläche definiert. Die dieser Definition zugrundeliegende Konzeption besteht aus zwei Schritten: Einmal werden ausgehend von der Erfüllung bestimmter geologischer Bedingungen die geometrischen Parameter (Anzahl, Raumstellung,

Flächengröße und Dichte) der Klüfte in Homogenbereichen der Felsmasse statistisch ermittelt. Zum anderen wird anhand dieser geometrischen Parameter ein Modell des Kluftflächengefüges in jedem Homogenbereich konstruiert und die "Kontinuität der Klüfte" für bestimmte geometrische Formen möglicher Bruchflächen berechnet.

3.2.3.1 Erhebung und Aufbereitung der Eingangsdaten

Voraussetzung für die Arbeit mit dieser Konzeption im Gelände ist die Erfüllung folgender geologischer Bedingungen:

a) daß die Klüfte entdeckbare Merkmale einer Felsmasse sind, die sich quantitativ erfassen lassen,

b) daß homogene Bereiche hinsichtlich des Kluftflächengefüges in einer Felsmasse existieren,

c) daß ein realistisches Modell, repräsentativ für die Klüftung in einer Felsmasse, konstruiert werden kann,

d) daß der Neubruch bei Beanspruchungen sich im wesentlichen an Kluftflächen hält, die entweder einer oder mehreren Kluftscharen angehören.

Zur Kluftaufnahme werden die in Erkundungsstollen sichtbaren Kluftausbisse zugrundegelegt. Zu diesem Zweck wird die "Meßgeraden-Aufnahme" (detail line survey) verwendet, die darin besteht, entlang eines 100 ft. langen Meßbandes - welches entlang der Aufschlußwand wiederholt angelegt wird - für jeden geschnittenen Kluftausbiß folgende Daten zu erheben:

- Ausbißlängen an den Ulmen des Stollens, auch "Kontinuität beim Streichen" (strike continuity) genannt,
- Ausbißlängen an der Firste und der Sohle des Stollens, auch "Kontinuität beim Einfallen"(dip continuity) genannt,
- Einfallswinkel und Einfallsrichtung.

Durch die statistische Auswertung dieser Daten wird zunächst die Definition der vorhandenen Kluftscharen und die Festlegung von Homogenbereichen vorgenommen.

Die Ausbißlängen beim Streichen bzw. beim Einfallen werden als Maß für die Breite bzw. Längserstreckung der Klüfte angesehen. Durch Korrelation dieser beiden bei den Klüften jeder Schar wird auf die allgmeine Kluftflächenform geschlossen.

Aus der Häufigkeitsverteilung der Ausbißlängen der Klüfte jeder Schar (Abb. 5) sowie aus der ermittelten geometrischen Form der Kluftflächen wird ferner auch auf die mittlere Kluftflächengröße jeder Schar geschlossen.

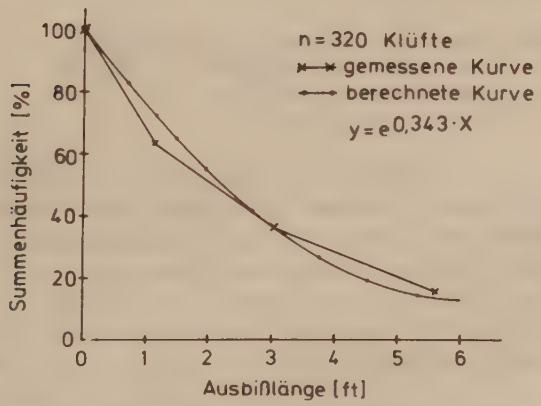


Abb. 5 Summenhäufigkeitskurve der Kluftausbißlängen einer Kluftschar in der De Beers Mine (Bereich D, Kluftschar b), nach ROBERTSON, 1970

Für die Ermittlung der Anzahl der Klüfte wie auch der Kluftdichte einer Schar wird ein beliebig festgelegter Bereich der Felsmasse mit der Endfläche A (normal zur "Meßgeraden") und der Länge L betrachtet, in dem n Klüfte der mittleren Größe a_m verteilt sind (Abb. 6). Alle Klüfte, die von der Meßgeraden geschnitten werden, werden gemessen.

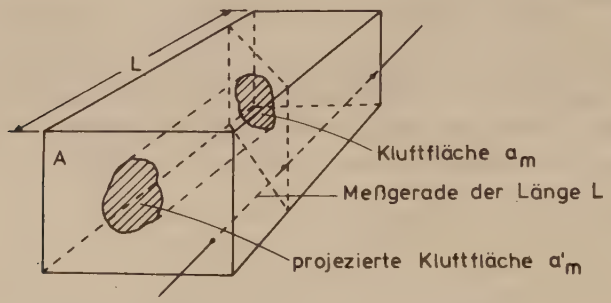


Abb.6 Ermittlung von Anzahl und Dichte der Klüfte einer Schar nach ROBERTSON, 1970 (Erläuterung s. Text)

Seien diese Klüfte $_1n$, wobei der Index $_1$ die Meßgerade andeutet. Die durchschnittliche Größe a'_m der Projektion jeder Kluftfläche auf die Endfläche A wird nach der Gleichung

$$a'_m = a_m \cdot \cos\vartheta_d \cdot \cos\delta_d \qquad (11)$$ ermittelt,

wobei ϑ_d und δ_d die horizontalen und vertikalen Winkelunterschiede zwischen der Normalen auf der mittleren Raumstellung der Kluftschar und der Meßgeraden sind. Die Wahrscheinlichkeit für eine der Klüfte, von der Meßgeraden durchstoßen zu werden, ergibt sich aus

$$_1P = \frac{a'_m}{A} \qquad (12)$$

vorausgesetzt, daß $a'_m \ll A$ ist.

Die Wahrscheinlich, daß $_1n$ der zufällig verteilten Klüfte von der Meßgeraden durchstoßen werden, wird nach dem binomialen Gesetz berechnet:

$$P(_1n) = \binom{n}{_1n} \; {}_1p^{\,{}_1n} \cdot {}_1q^{\,n-{}_1n} \qquad (13)$$

Aus Gl. (12) und Gl.(13) ergibt sich die Anzahl der Klüfte n durch

$$\hat{n} = \frac{_1n}{_1p} = \frac{_1n \cdot A}{a_m \cdot \cos\vartheta_d \cdot \cos\delta_d} \qquad (14)$$

Aus (14) wird dann auch die Kluftdichte D durch

$$\hat{D} = \frac{\hat{n}}{AL} = \frac{_1n}{L \cdot a_m \cdot \cos\vartheta_d \cdot \cos\delta_d} \qquad (15) \text{ ermittelt.}$$

3.2.3.2 Rechnerische Bestimmung der "Kontinuität der Klüfte"

Zur quantitativen Ermittlung der "Kontinuität der Klüfte" werden grundsätzlich zwei Modelle von möglichen Bruchformen betrachtet. Zur Vereinfachung der mathematischen Überlegungen werden hierbei die Klüfte wie auch die möglichen Bruchflächen als lineare Größen betrachtet (JENNINGS, 1970, 1972).

a) erstes Modell

Der Bruch soll hier von Kluft zu Kluft die Materialbrücken etwa in einer Ebene überwinden, sofern die Klüfte auch in einer Ebene liegen und die Orientierung des Bruches mit der Kluftstellung übereinstimmt (Abb. 7). Der Koeffizient der Kontinuität der Klüfte wird hier in gleicher Weise wie der PACHER'sche ebene Durchtrennungsgrad erfaßt, nämlich als

der Längenanteil der Klüfte Σ La an der gedachten, diese enthaltenden Bruchlinie:

$$\varkappa_a = \frac{\sum L_a}{\sum L_a + \sum L_b} \qquad (16)$$

wobei $\sum$ Lb die Materialbrücken bedeutet.

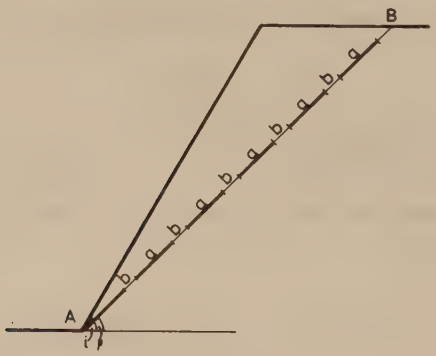
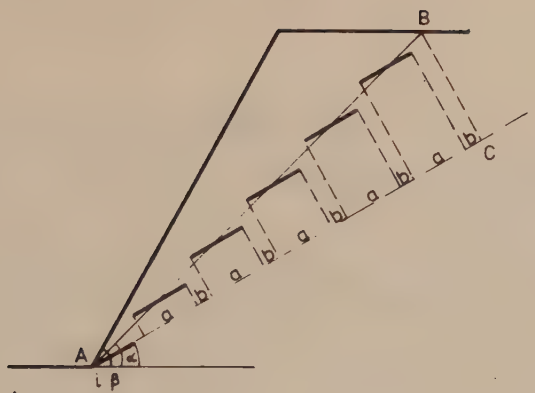


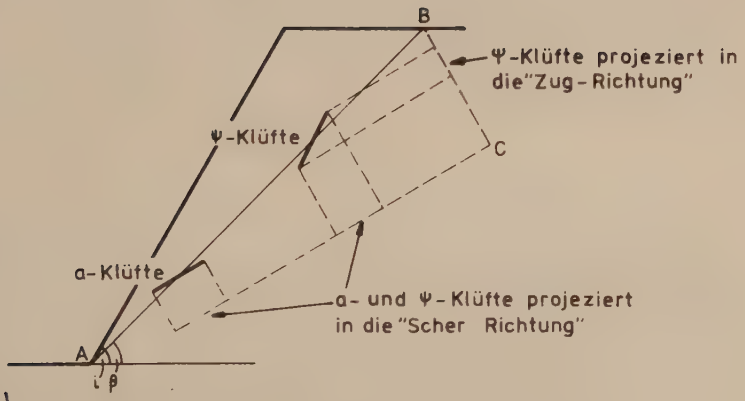
Abb.7 Modell einer ebenen Bruchfläche nach JENNINGS, 1970

b) Zweites Modell

Der Bruch soll hier "staffelförmig" von der einen Kluft zu der anderen entlang einer Strecke verlaufen, welche die mittlere Bruchfläche darstellt und die Klüfte durchschneidet. Abb. 8 a schildert den Fall der staffelförmigen Bruchfläche durch die Klüfte einer Schar (einscharige Betrachtung). Durch α und β sind die mittleren Einfallswinkel der Kluftschar und der Bruchfläche (bzw. -linie) AB entsprechend angegeben. Der Koeffizient der Kontinuität der Klüfte, auch "Koeffizient in Scher-Richtung" genannt, wird durch das Verhältnis der von der Bruchlinie AB geschnittenen Längenanteile der Kluftschar ΣL_{a_i} zur Gesamtlänge der Bruchlinie



a)



b)

Abb. 8 Modell einer staffelförmigen Bruchfläche
a) entlang von Klüften einer Schar
b) entlang von Klüften zweier Scharen
nach JENNINGS, 1970

- in die α-Richtung projeziert - errechnet.

$$\varkappa_s = \frac{\sum L a_i}{AB \cos(\beta-\alpha)} = \frac{\sum L a_i}{AC} \qquad (17)$$

In Abb. 8b ist der Fall der staffelförmigen Bruchfläche durch Klüfte zweier Scharen dargestellt (mehrscharige Betrachtung). Durch α , ψ und β sind hier die mittleren Einfallswinkel der beiden Kluftscharen und der Bruchlinie AB entsprechend angegeben. Neben der "Kontinuität in Scher-Richtung" ($\varkappa_s$) wird hier auch noch die "Kontinuität in Zug-Richtung" ($\alpha + 90^o$) durch den Koeffizienten $\varkappa_t$ erfaßt werden. Beide Koeffizienten werden durch das Verhältnis der von der Bruchlinie AB geschnittenen - sich nicht überschneidenden - Längenanteile beider Kluftscharen $\Sigma L a_i$ und $\Sigma L \psi_i$ in die α-Richtung (AC) für die Kontinuität in Scherrichtung und in die $(\alpha + 90^o)$-Richtung (BC) für die Kontinuität in Zugrichtung projeziert, ermittelt:

$$\varkappa_s = \frac{\sum L a_i + \sum L \psi_i}{AC} \qquad (18)$$

$$\varkappa_t = \frac{\sum L \psi_i}{AB \sin(\beta-\alpha)} = \frac{\sum L \psi_i}{BC} \qquad (19)$$

Die nach der linearen Betrachtung von Klüften und möglichen Bruchflächen ermittelten Koeffizienten der "Kontinuität" der Klüfte sind nach JENNINGS (1970) - wenn auch konservativ - für Berechnungszwecke relevant und können in Problemstellungen der Ingenieurpraxis verwendet werden. Eine solche konservative Ermittlung von $\varkappa$ ist nach STEFFEN und JENNINGS (1974) deshalb für die Praxis geeignet, weil dieser in die Berechnung der Festigkeit entlang von möglichen Bruchflächen empfindlich eingeht und die zu ermittelnden Werte für die Standsicherheit von Böschungen beträchtlich beeinflußt.

3.3 Experimentelle Konzeptionen

Bereits in früheren geomechanischen Modellversuchen - so z.B. bei L. MÜLLER und PACHER, 1965 - wird der "Durchtrennungsgrad" als ein wichtiger Parameter zur Ermittlung des Einflusses des Trennflächengefüges auf Bruch und Verformbarkeit von geklüfteten Medien bewertet. Auch die Nachfolgearbeiten von JOHN, 1969; LAJTAI, 1969; L. MÜLLER et al., 1973 können neben anderen als repräsentativ hierfür angesehen werden. Es ist erwähnenswert, daß in diesen experimentellen Arbeiten der Durchtrennungsgrad ausschließlich in der Definition des "ebenen Durchtrennungsgrades" nach PACHER (Kap. 3.2.1) gegeben wird. Der erste Versuch, andere Definitionen eines Maßes der Materialdurchtrennung vorzuschlagen, welche sowohl für geomechanische Modellversuche als auch für zweidimensionale Berechnungen der Felsbaupraxis anwendbar sein sollten, geht nach Wissen des Verfassers auf K. MÜLLER, 1974 zurück. Ausgehend von Betrachtungen an plastischen Ton-Wasser-Gemischen, schlägt K. MÜLLER, 1974 drei voneinander unabhängige Möglichkeiten zur "Neuformulierung" des Durchtrennungsgrades vor. In allen drei Konzeptionen wird die Erfassung der Materialdurchtrennung in ebenen Schnitten behandelt, welche normal zu den Klüften stehen.

3.3.1 Meßstreifenauszählung

Der Durchtrennungsgrad wird hier durch das Verhältnis der in einem Meßstreifen gelegenen Kluftausbißlängen zur Gesamtfläche des Meßstreifens bestimmt (Abb. 9). Die Dimensionen (Länge und

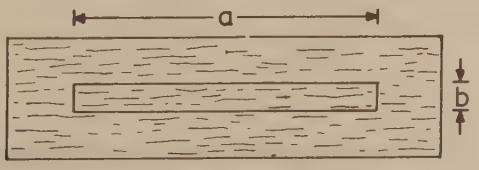


Abb. 9 Meßstreifenfläche a·b; a parallel zur Fugenschar nach K. MÜLLER, 1974

Breite) dieses Meßstreifens sollen ein Vielfaches der mittleren Erstreckung und des Abstandes der Kluftausbisse betragen. Um zu unterscheiden, ob das somit errechnete Maß für den Durchtrennungsgrad aus zahlreichen kleinen oder aber aus wenigen großen Klüften zustandegekommen ist, soll hierbei eine Gliederung der vorhandenen Kluftausbißlängen in Längenklassen vorgenommen werden. Anhand von wiederholten Meßstreifenauszählungen an verschiedenen Orten des Meßbereiches wird ein statistischer Mittelwert bestimmt, dessen Streuung als Maß für den Grad der Homogenität bzw. Inhomogenität in bezug auf den soeben ermittelten Durchtrennungsgrad betrachtet wird.

3.3.2 Koordinatendarstellung der Materialbrücken

Nach dieser Konzeption besteht die Beschreibung der Diskontinuität von Trennflächen in der Kennzeichnung der zwischen den Kluftausbissen gelegenen Materialbrücken durch kartesische- oder Polarkoordinaten (Abb. 10). Bei der Verwendung von

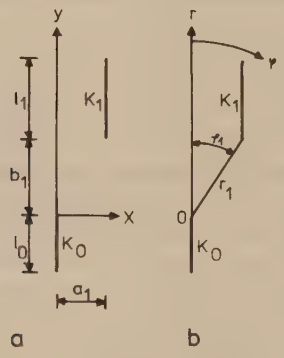


Abb.10 Koordinatendarstellung der Materialbrücken

a) in kartesischen Koordinaten
b) in Polarkoordinaten

nach K. MÜLLER, 1974

kartesischen Koordinaten wird der Ursprung am Endpunkt eines jeweils betrachteten Kluftausbisses festgelegt. Die positive y-Achse des Koordinatensystems wird dann in der Fortsetzung der Kluftausbisse parallel zur Kluftschar verstanden (Abb. 10). Zur Festlegung der Entfernung und der Richtung zu den nächstgelegenen Kluftausbißenden werden die Koordinatenabschnitte a und b sowie der arctg $^{a}/_{b}$ verwendet.

Bei der Verwendung von Polarkoordinaten wird analog zu den kartesischen Koordinaten verfahren. Zur Festlegung der Entfernung und der Richtung zu den nächstgelegenen Kluftausbißenden werden hierbei die Winkel r und q (Abb. 10) verwendet.

Um aus diesen Angaben über die Materialbrücken ein Maß für den Durchtrennungsgrad zu erhalten, müssen noch nach K. MÜLLER (1974) die jeweiligen Längen der zugehörigen Kluftausbisse in die Betrachtung miteinbezogen werden: "Die Fugenlänge und ihr Verhältnis zur Materialbrückenlänge (unter Einbeziehung der Winkelabweichung derselben von der Orientierung der Fugenschar) gibt (statistisch ermittelt) ein Maß für die Durchtrennung innerhalb des betrachteten Bereiches und zusätzlich eine Angabe über die Fugenabstände".

3.3.3 Verteilung der Fugenmittelpunkte

In dieser Konzeption wird die Durchtrennung durch die Angabe einer mit Gewichten versehenen Mittelpunktverteilung der Kluftausbisse einer Schar beschrieben. Die Gewichte der Kluftausbißmittelpunkte sollen die jeweiligen Ausbißlängen kennzeichnen (Abb. 11)

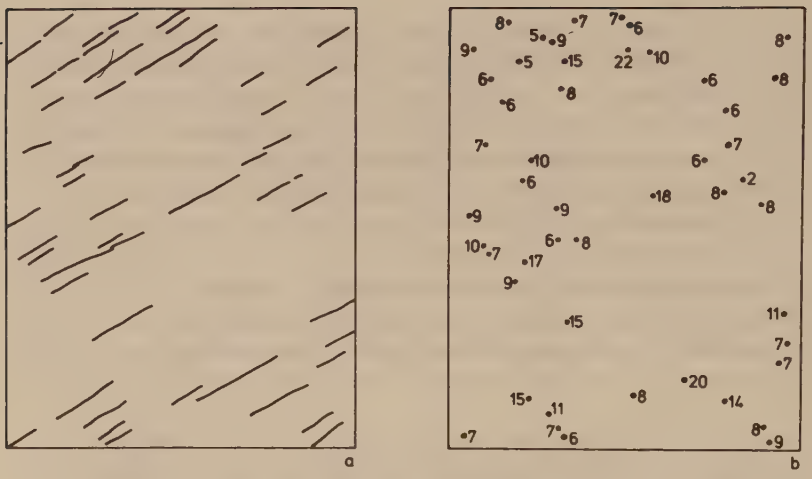


Abb.11 a) Verteilung von Fugen; b) Verteilung der zugehörigen Fugenmittelpunkte. Gewichte geben die Ausstrichlängen an, nach K.MÜLLER, 1974

3.4 Spezielle Verfahren zur Erfassung von Kluftflächengrößen

3.4.1 LNEC (Portugal)

DA SILVEIRA et al., 1966 beschreiben die Methoden, welche vom LNEC (Laboratório National de Engenharia Civil) in Lissabon (Portugal) zur quantitativen Charakterisierung der geometrischen Parameter der Klüfte (Raumstellung, Abstand und Flächengröße) verwendet werden. Die Bestimmung der einzelnen Kluftflächengrößen und, davon abgeleitet, die Ermittlung der mittleren Kluftflächengröße einer jeden Kluftschar wird anhand ihrer sichtbaren Kluftausbisse in geometrisch definierten Aufschlüssen vorgenommen. Die geometrische Form der einzelnen Kluftflächen wird hierbei allgemein als kreisförmig angenommen. Es werden grundsätzlich zwei Aufschlußtypen betrachtet:

a) Erkundungsstollen und Schächte mit rechteckigem Querschnitt

Die mittlere Kluftflächengröße A_s einer Schar wird durch folgende Gleichung gegeben (s. auch Abb. 12):

$$A_s = \frac{\left[1+\sqrt{1+\frac{4\pi \cdot A_g}{p_g}\left(\frac{1}{i_s}-\frac{1}{p_g}\right)}\right]^2}{4\pi\left(\frac{1}{i_s}-\frac{1}{p_g}\right)^2} \qquad (20)$$

Gilt

$$A_s < \frac{\pi \cdot a^2}{4\sin^2\alpha} \quad \text{und} \quad A_s < \frac{\pi \cdot b^2}{4\sin^2\gamma} \qquad (21)$$

so wird anstatt Gl. (20) folgende Gleichung verwendet:

$$A_s = \frac{4}{\pi \cdot \left[\frac{1}{i_s}-\frac{1}{p_g}\cdot\left(1-\frac{4\cos\beta}{\pi \sin\alpha \cdot \sin\gamma}\right)\right]^2} \qquad (22)$$

Die in den Gl. (20), (21) und (22) verwendeten Begriffe und Symbole werden wie folgt definiert:

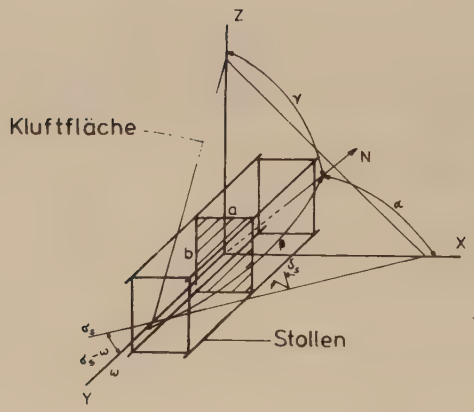


Abb.12 Benutzte Symbole für die Flächengrößenermittlung nach DA SILVEIRA et al., 1966

a,b : Breite und Höhe des Erkundungsstollens
ω : Richtung der Stollenachse
G_s, δ_s : Streichen und Einfallen der Kluftschar (Mittelwerte)

A_g = Schnittfläche des Stollens mit einer Ebene parallel zur mittleren Raumstellung der Kluftschar. Für diese gilt

$$A_g = \frac{a \cdot b}{\cos \beta} \qquad (23)$$

P_g = Perimeter der Schnittfläche A_g. Diese wird durch die Gleichung

$$p_g = \frac{2(a \cdot \sin\gamma + b \cdot \sin\alpha)}{\cos\beta} \qquad (24)$$

ermittelt.

i_s = Mittlere Ausbißlänge der Kluftschar im Stollen.

$\cos\alpha$, $\cos\beta$, $\cos\gamma$ = Richtungskosinus der normalen N auf der mittleren Raumstellung der Kluftschar im Koordinatensystem X, Y, Z.

b. Quadratische Felsoberfläche

Die mittlere Kluftflächengröße A_s einer Schar wird durch die Gleichung

$$A_s = \frac{4}{\pi \cdot \left[\frac{1}{i_s} - \frac{1}{a}\left(\sin\mu + \cos\mu\right)\right]^2} \qquad (25)$$

berechnet, wobei

a = Kantenlänge der quadratischen Aufschlußoberfläche, und

μ = Winkel zwischen einer der Kluftausbisse der Schar und einer der Kanten der Aufschlußoberfläche sind.

3.4.2 MAHTAB et al., 1973

MAHTAB et al., 1973 definieren in ihren Untersuchungen zur geometrischen Erfassung des Trennflächengefüges in San Manuel Copper Mine, Arizona als Erstreckung der Klüfte jeder Schar die Länge der Projektionen der an Ulmen von Stollen sichtbaren Kluftausbisse in einer senkrechten, parallel zu den Ulmen verlaufenden Ebene.

Vertreter		Bezeichnung	Definition		Erhebung der Eingangsdaten im Gelände	Berechnung			Problemmstellung
			rein geometrisch-deskriptiv	unter Einbeziehung mechanischer Gesichtspunkte	Aufnahme und statistische Auswertung von Kluftausbissen	von mittlerer Flächengröße und Anzahl der Klüfte jeder Schar	Durchtrennungsgrad in Schnittebenen und im Raum	Durchtrennungsgrad in Bezug auf mögliche Bruchflächen	
PACHER	1959	ebener und räumlicher Kluftflächenanteil bzw Durchtrennungsgrad	●		●	●	●		allgemein
MULLER, L	1958 1963	Durchtrennungsgrad Degree of Separation	●		●	●	●		allgemein
JOHN	1962 1969	Extent of Joints Durchtrennungsgrad	●		●	●	●		allgemein
TERZAGHI	1962	Effective Joint Area	●		●	●	●+)		Boschung
DA SILVEIRA et al	1966	Joint Area, Set Area			●	●			allgemein
LAJTAI	1969	Degree of Separation	●		●	●	●+)		Modellversuche
WERNER	1970	Durchtrennungsgrad	●		●	●	●+)		allgemein
HERGET	1970	Continuity Ratio	●		●	●	●+)		Tunnel
PIGOROV	1971	Degree of Massiv Dissection	●		●	●	●		allgemein
RICHARDS	1972	Extent of Diskontinuities	●		●	●	●		allgemein
JENNINGS ROBERTSON MacG. PITEAU	1968-1973	Continuity of Joints		●	●	●	●+)	●	allgemein
MAHTAB et al.	1973	Extent of Fracture			●	●			Tunnel
MULLER, K.	1974	Durchtrennungsgrad	●		●	●	●+)		Modellversuche
HEITFELD HESSE	1974	Plane Degree of Separation	●		●	●	●		Kavernen
RODATZ	1975	Durchtrennungsgrad	●		●	●	●		allgemein
SECOND DRAFT OF ISRM WORKING PARTY	1975	Persistance		●	●	●	●+)	●	allgemein
DEUTSCHE BUNDESBAHN (Tunnelbaurichtlinien)	1976	Durchtrennungsgrad	●		●	●	●		Tunnel

+) Hier ausschließlich in Schnittebenen

Tab 1 Übersicht über die in der Felsmechanik-Literatur vorliegenden Konzeptionen zur Erfassung des "Durchtrennungsgrades" und ihre Vertreter

3.5 Diskussion und Folgerungen

Für die Bestimmung des Durchtrennungsgrades gehen die bestehenden Konzeptionen grundsätzlich von einer geometrisch-statistischen Erfassung des Kluftflächengefüges aus (zunächst eindimensional an den Kluftausbissen einer Schar), welche entweder einer vorgegebenen geometrischen Definition des Durchtrennungsgrades zugrunde gelegt wird (Kap. 3.2.1 und Kap. 3.2.2) oder aber einer sich anschließenden mechanischen Deutung als Grundlage dienen soll (Kap. 3.2.3 und Kap. 3.3). In allen diesen mehr ingenieurmäßig orientierten Konzeptionen wird dem Bedürfnis nach einer Beschreibung des Durchtrennungsgrades in Abhängigkeit von den geologischen Gegebenheiten im Gebirge kaum oder überhaupt nicht entsprochen.

Die geologisch bedingten Eingangsdaten, insbesondere die geometrischen und mechanischen Eigenschaften des Trennflächengefüges zählen jedoch zu denjenigen Faktoren, welche den Durchtrennungsgrad eines geklüfteten Gesteinskörpers maßgeblich bestimmen. Ihre Abhängigkeit von den örtlich abweichenden geologischen Gegebenheiten bedingt, daß eine praxisorientierte und geländegerechte Erfassung des Durchtrennungsgrades ohne die Berücksichtigung der jeweiligen geologischen Verhältnisse nicht möglich ist.

Für die weiteren Betrachtungen scheint es daher methodisch sinnvoll, zunächst die Bedeutung von grundlegenden geologischen Einflußfaktoren für den Durchtrennungsgrad näher zu untersuchen. Erst auf der Grundlage dieser Untersuchungen können sowohl die vorstehenden Konzeptionen zur Erfassung des Durchtrennungsgrades kritisch bewertet und die Problematik dieses Parameters näher untersucht als auch die Voraussetzungen für die eigene Konzeption geschaffen werden.

4. BEDEUTUNG GEOLOGISCHER FAKTOREN FÜR DEN DURCHTRENNUNGSGRAD

4.1 Vorbemerkungen

Die Ausbildung des Gebirgsverbandes und der petrographische Gesteinsaufbau sind die bedeutendsten geologischen Faktoren, die den Durchtrennungsgrad beeinflussen. Gewicht und Bedeutung dieser Faktoren können mit den geologischen Gegebenheiten von Ort zu Ort stark variieren. Die Darstellung dieser Einflußfaktoren sowie eine Analyse ihres möglichen Zusammenwirkens hinsichtlich des Durchtrennungsgrades können deshalb nicht auf allgemeiner, sondern vielmehr auf regionaler Basis, und zwar an Gesteinskörpern in stratigraphisch, petrographisch und tektonisch wohl definierten Umgebungen vorgenommen werden. Die Klüftung, so meint SECOR (1965), erreiche ihre größte Regelmäßigkeit und Vollkommenheit in Bereichen mit nahezu horizontal liegenden Sedimentgesteinen, in denen andere tektonische Strukturelemente kaum oder überhaupt nicht auftreten. Es ist daher methodisch naheliegend, bei Grundlagenuntersuchungen über den Durchtrennungsgrad von Gesteinen oder Gesteinsbereichen auszugehen, in denen eine Überprägung des Kluftflächengefüges durch sonstige tektonische Strukturelemente (Falten, geologische Störungen) nur geringfügig oder überhaupt nicht gegeben ist.

4.2 Untersuchte Aufschlüsse

In vorliegender Arbeit wird die Untersuchung und Darstellung der geologischen Einflußfaktoren hinsichtlich des Durchtrennungsgrades auf geschichtete Sedimentgesteine beschränkt. Folgende Gründe gaben Anlaß zu dieser Einschränkung:

- die Tatsache, daß einerseits Sedimentgesteine einen wesentlichen Teil (etwa 80 %) der Oberfläche der festen Erdkruste einnehmen, andererseits der Felsbau zum großen Teil im allerobersten Erdkrustenbereich betrieben wird,
- die relativ gute Kenntnis über die Art, Anzahl und Ausbildung der in Sedimentgesteinen entwickelten Trennflächenscharen,

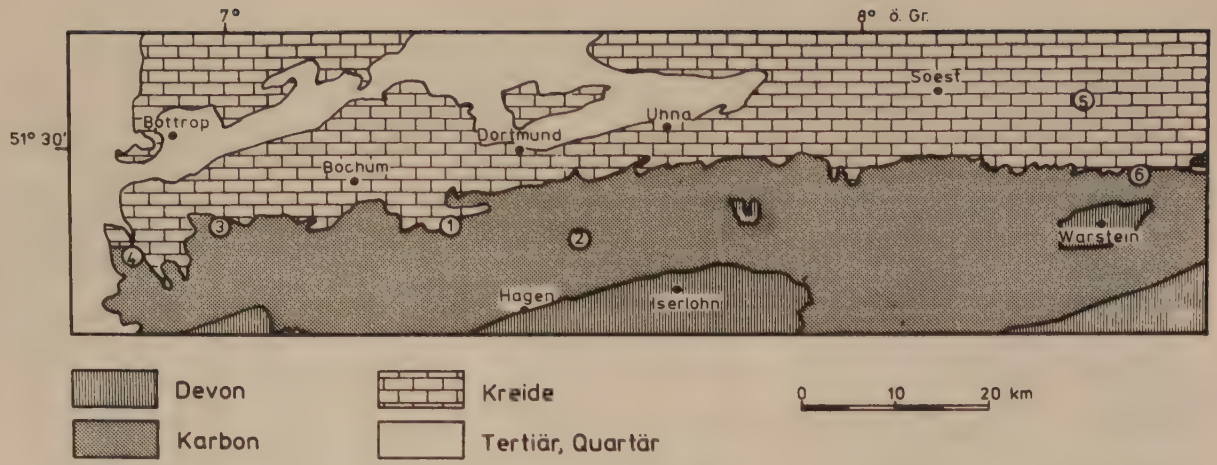


Abb.13 Lage der untersuchten Aufschlüsse (Nummerierung entsprechend Tab. 2)

Nr.	Lokalität	Top. Karte Blatt-Nr.	Koordinaten R	Koordinaten H	Art	Einordnung Stratigr.	Einordnung Petrogr.
1	Witten	4510	$^{25}94400$	$^{57}99450$	Steinbruch	Oberkarbon (Namur)	Sand-/Tonstein
2	Westhofen	4511	$^{33}97000$	$^{57}99175$	Steinbruch	Oberkarbon (Namur)	Sand-/Tonstein
3	Essen-Heisingen	4508	$^{25}72860$	$^{56}97290$	Böschung	Oberkarbon (Westfal A)	Sand-/Tonstein
4	Mülheim a. d. Ruhr	4507	$^{25}60000$	$^{56}98700$	Steinbruch	Oberkarbon (Westfal A)	Sand-/Tonstein
5	Anröchte	4415	$^{34}53687$	$^{57}15825$	Steinbruch	Oberkreide (Turon)	Glaukonitischer sandiger Kalkstein ("Grünkalkstein")
6	Drewer	4516	$^{34}55475$	$^{57}06775$	Steinbruch	Oberdevon-Unterkarbon	Kalk-/Mergelstein
7	Katafourkon (NW Griechenland)	-	-	-	Böschung	Eozän (Flysch)	Sand-/Ton-/Mergel-/Kalkstein

Tab. 2: Näher untersuchte Aufschlüsse

- das häufige Auftreten von relativ gut aufgeschlossenen Sedimentgesteinen im Ruhrrevier und insbesondere in der näheren Umgebung Bochums.

An verschiedenen Lokalitäten wurden in unterschiedlichen stratigraphischen Niveaus stichprobenartig gewählte Gesteinsaufschlüsse festgelegt (Abb. 13). Die Stratigraphie, Petrographie und Tektonik der untersuchten Gebiete sind in mehreren Arbeiten ausführlich erläutert worden (z. B. HAHNE, 1958; ADLER et al., 1964; BRAUN, 1964). In Tab. 2 sind die wichtigsten der näher untersuchten Aufschlüsse aufgeführt und deren geographische und geologische Eigenschaften zusammengefaßt.

4.3 Zur Charakterisierung der Klüfte

Als Klüfte werden im Sinne von STINI alle diejenigen tektonisch entstandenen Trennflächen im Gestein bezeichnet, entlang denen der Gesteinszusammenhalt aufgehoben ist.* Voraussetzung für eine Analyse der Klüftung im Hinblick auf die jeweils vorkommenden Kluftscharen ist nach L. MÜLLER (1963) die Kenntnis über die Entstehung der Klüfte selbst. In vielen Fällen fehlen zur Zeit der Kluftaufnahme im Gelände eindeutige Hinweise über die vorausgegangene tektonische Beanspruchung, welche zur Entstehung der Klüfte geführt hat. Entscheidend für eine Charakterisierung der Klüfte nach genetischen Gesichtspunkten ist daher, ob die Kluftflächen im Gelände als Trenn- oder Gleitungs- bzw. Verschiebungsbrüche anzusehen sind. In der geologischen und geomechanischen Literatur werden grundsätzlich folgende Merkmale zur genetischen Unterscheidung von Klüften verwendet:

---

* Nach CLOOS, 1936 wie auch nach PRICE, 1966 werden als Klüfte diejenigen Trennflächen im Gestein bezeichnet, entlang denen keine meßbaren Verschiebungen stattgefunden haben. Die Aussage, ob an Klüften eine Verschiebung stattgefunden hat oder nicht, ist nur eine Frage der Beobachtungsgenauigkeit. Diese Aussage bezieht sich auf den dm- bis m-Bereich. Sie besagt jedoch nicht, daß Verschiebungen im mm- bis cm-Bereich auszuschließen wären.

a) Oberflächenrauhigkeit: Gleitungsbrüche zeigen eine meist ebene und glatte Kluftoberfläche. Nicht selten trägt sie Harnische. Die Oberfläche von Trennbrüchen ist dagegen rauher und häufig durch Flächenstrukturen gekennzeichnet (Kap. 4.4), welche aufgrund von werkstoffkundlichen Analogien eindeutig als Beweis für den Trennbruchcharakter dieser Klüfte angesehen werden (z. B. GRAMBERG, 1965; BANKWITZ, 1966; dort weitere Literatur).

b) Lagebeziehung zu anderen Gefügeelementen (weniger stichhaltig): Die oft deutlichen Symmetriebeziehungen der Klüfte zum tektonischen Bauplan eines Gebietes (insbesondere zu Faltenstrukturen) werden in der Fachliteratur häufig auch zu ihrer genetischen Charakterisierung verwendet. Nach CLOOS (1936) sowie nach PRICE (1966) werden Klüfte, die normal zur Faltenachse b stehen (ac- bzw. OkO-Klüfte, nach SANDER, 1948) als Trennklüfte bezeichnet.

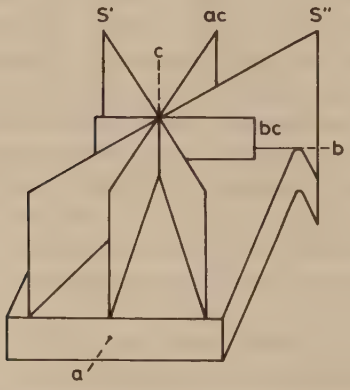


Abb.14 Illustration der Symmetriebeziehung von ac-, bc- und S-Klüften zur Faltenstruktur nach PRICE, 1966

(Abb. 14). Klüfte, die senkrecht zu den ac-Klüften stehen und parallel zur Faltenachse verlaufen (bc- bzw. h00-Klüfte), werden ebenfalls als Trennklüfte klassifiziert. Dagegen werden alle anderen Klüfte, die den rechten Winkel zwischen den ac- und bc-Klüften durchschneiden - also diagonal zur Faltenachse verlaufen (S-Klüfte) - als Gleitungs-/Verschiebungsbrüche bezeichnet.

c) Kluftfüllungen (weniger stichhaltig): Kluftfüllungen und Kristallrasen dokumentieren eine Öffnungsbewegung der Kluftwandungen (z. B. BOCK, 1972; HOEPPENER, 1975).

In den untersuchten Sedimentgesteinen konnten stets zwei morphologisch ungleichwertig ausgebildete "Haupt- und Nebenkluftscharen" erkannt werden, die nahezu senkrecht zueinander und normal zu den Schichtflächen stehen und welche aufgrund der bereits genannten Unterscheidungsmerkmale als Trennklüfte zu klassifizieren sind. Komplexere Kluftsysteme waren entweder auf eine Überlagerung mehrerer dieser dominierenden Kluftsysteme oder auf örtliche tektonische Vorgänge zurückzuführen. Dieses dominierende Kluftbild entspricht demjenigen Kluftsystem, das von KENDALL und BRIGGS (1933) als für Sedimentgesteine typisch angesehen wird. Nach NICKELSEN und HOUGH (1967) sowie BOCK (1972) wird es sogar als "fundamentales Kluftsystem" bezeichnet.

Eine zweite Geländebeobachtung ist nicht weniger bedeutsam: Die von vielen Trennkluftflächen getragenen Flächenstrukturen stellen ein wichtiges Hilfsmittel zur Erfassung der geometrischen Form dieser Kluftflächen dar. So zeigte sich am Beispiel der eigenen Untersuchungen, daß man - ausgehend von der Betrachtung dieser Flächenstrukturen - zu gewissen Vorstellungen über die geometrische Form der Trennkluftflächen gelangt, welche für die Ermittlung der einzelnen Kluftflächengrößen wichtig sind. Nicht zuletzt aus diesem Grunde erscheint eine Erläuterung der geometrischen Merkmale der Trennkluftflächen für die weiteren Betrachtungen als zweckmäßig.

4.4 Zur Geometrie der Trennkluftflächen

Die Oberfläche vieler Trennklüfte ist durch federartige Strukturen gekennzeichnet, welche in Form von feinen Wülsten und Rillen von einer Achse seitwärts oder von einem Punkt radial abzweigen und sich auf beiden Wänden der Kluft entsprechen. Angeschlossen an diese "Federstrukturen" sind häufig weitere, diesen untergeordnete Flächenstrukturen (Abb. 15 - 19). Diese Flächenstrukturen sind erstmalig von WOODWORTH, 1895 und später von HODGSON, 1961b und BANKWITZ, 1966 vollständig beschrieben und klassifiziert worden (s. Tab. 3) und haben sicher mehr als nur regionale Bedeutung. Ein Beweis dafür kann in dem bisher bekannt gewordenen Beobachtungsmaterial, welches ein breites Spektrum von Sedimentgesteinen und magmatischen Gesteinen umfaßt (s. Tab. 4), sowie in den eigenen Vergleichsbeobachtungen

WOODWORTH	HODGSON	BANKWITZ
Joint plane	Maint joint face	Hauptkluftfläche
Fringe	Fringe	Randkluftzone
feather fracture	plumose structures	Besen oder Feder
Border planes (b-planes)	F-joints (b-planes)	Randkluft
cross fractures (c-planes)	c-fractures	Stirnflächen
Rim of conchoidal fractures	conchoidal ridges	Ringstrukturen
Shulder	Shulder	Kluftknicke

Tab. 3: Begriffsparallelisierung über die Kluftflächenstrukturen (modifiziert nach BANKWITZ, 1966; Tab. 2)

Verfasser	Gestein	Stratigraphische Einordnung	Lokalität
WOODWORTH, 1895 1896	Tonschiefer	Kambrium	Mystic River, Cambridge, Massachusetts
DALE and GREGORY, 1911	Granit	Karbon	Connecticut
PARKER, 1942	Sandstein/Tonschiefer	Silur und Devon	Vorland der nörd. Appalachen
RAGATT, 1954	Siltstein	Eozän	Demon's Bluff Formation, Anglesea, Victoria
HODGSON, 1961a	Sand- und Kalk-/Tonstein	Oberkarbon-Oberkreide	Colorado Plateau, nordöst. Arizona und südöst. Utah
ROBERTS, 1961	Sand- und Kalk-/Tonstein	Devon-Jura	South Wales, Coalfield
HILL, 1965	Dolerit	Jura	Mersey Bluff, Tasmania
BANKWITZ, 1965a	Sandstein, Grauwacke Tonschiefer, "Porphyroide" Granit, Metadiabase, Amphibolithe	Proterozoikum-Karbon	Thüringisches Schiefer- Gebirge
GRAMBERG, 1966 1969	Sand- und Kalk-/Tonstein Massenkalk, Dolomite	Devon-Karbon	Bayerische und Öster- reichische Alpen, Rocky Mountains
FECKER, 1971	Sand-/Tonstein	Trias	nordwestl. Neustadt a.d.W.
BOCK, 1972	Sand- und Kalk-/Tonstein	Trias-Kreide	Süddeutsche Großsohle
REIK, 1974	Sand- und Siltsteine	Kreide	östl. der Main Ranges South Ram River Gebiet, Alberta, Kanada

Tab. 4: Übersicht über die in der geologischen Literatur vorliegenden Beobachtungen über die Kluftflächenstrukturen.

in mehreren Gesteinen unterschiedlichen stratigraphischen Niveaus (s. Tab. 2) gesehen werden. Als Grundlage für die nachstehenden Erläuterungen der Kluftflächenstrukturen, welche ebenfalls zur Dokumentation der eigenen Geländeuntersuchungen gedacht sind, ist die bisher ausführlichste Klassifizierung nach BANKWITZ (1966) verwendet worden. Die hierbei benutzen Abbildungen stammen überwiegend aus eigenen Beobachtungen und sollen als repräsentativ für zahlreiche gleichartige Beispiele angesehen werden.

a) Hauptkluftfläche (s. Abb. 15): Die Hauptkluftfläche ist der wesentliche und häufig auch der allein meßbare Teil der eigentlichen Kluftfläche und deshalb für die Ermittlung der

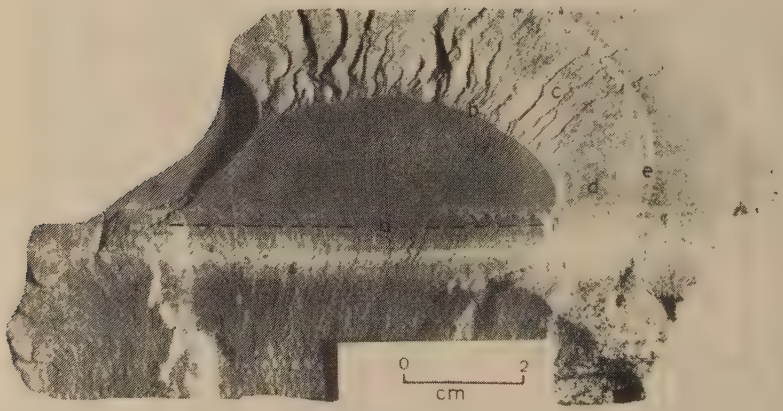


Abb.15 Ellipsenförmige Kluftfläche mit Fächenstrukturen a) Hauptkluftfläche mit Federachse parallel zu den Schichtflächen (ss); b) Radialklüfte ; c) Randklüfte ; d) Kluftknicke , e) Ringstruktur (Kieselschiefer ; Niedermarsberg)

Kluftflächengröße von besonderer Bedeutung. Diese kann eben bis leicht gekrümmt sein. Gehen ihre Federstrukturen von einer Achse aus, so verläuft die Achse in der Regel parallel zu den Schichtflächen bzw. zu den Schichtfugen, mit denen sie häufig übereinstimmt. In diesem Falle zeigt die Hauptkluftfläche eine geometrisch elliptische Form, welche ebenfalls parallel zu den Schichtflächen angelegt ist. Gehen die Federstrukturen nicht von einer Achse, sondern von einem Punkt aus, so weist die Hauptkluftfläche eine kreisförmige Konfiguration auf (s. Abb. 16).

Abb.16 Blick auf eine nahezu kreisförmige Kluftfläche. Federstrukturen gehen nicht von einer Achse, sondern von einem Punkt (A) aus. (Zeche Carl Funke, Essen-Heisingen)

b) Radialklüfte (Abb. 17 - 19): Diese sind der Hauptkluftfläche als zusätzliche, flach geneigte, schmale Kleinkluftflächen aufgesetzt, die sich aus den Federstrukturen allmählich entwickeln. Ähnlich wie die Federstrukturen gehen die Radialklüfte von einem zentralen Bereich aus und sind in radialer Richtung zwischen mehreren cm und einigen m ausgedehnt. Ihre Breite senkrecht zum Radialverlauf beträgt von cm bis dm und nimmt von der Hauptkluftfläche zum Rand hin zu. Bei starker Ausprägung der Radialklüfte ist nach BANKWITZ (1965a) im Grenzfall keine Hauptkluftfläche mehr zu erkennen, sondern nur spiralige Randklüfte, die sich wie die Blätter eines "ausgebreiteten Kartenspiels" überdecken (s. Abb. 17).

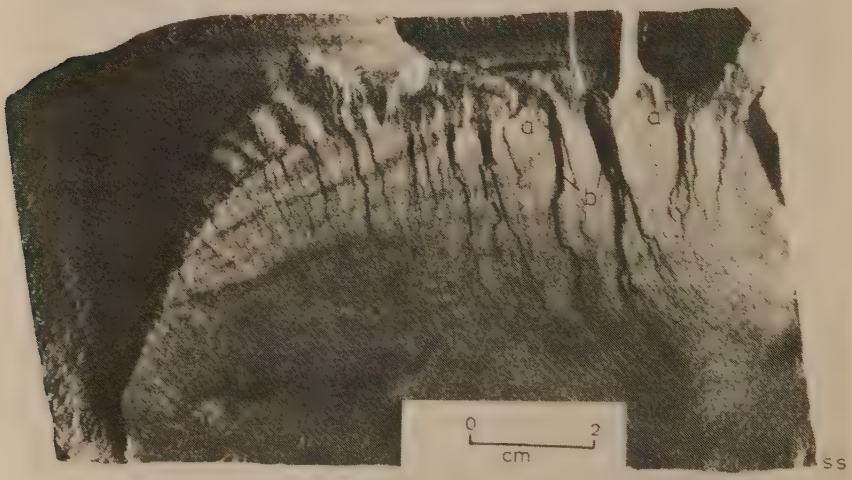


Abb.17 Teil einer ellipsenförmigen Hauptkluftfläche mit ausgeprägten Radialklüften (a) und Stirnflächen (b), die von den Federstrukturen weiterentwickelt worden sind. Federachse verläuft entlang der Schichtfläche (ss) (Kalkstein-Steinbruch in Drewer/Sauerland)

Abb.18 Teil einer Kluftfläche mit gut ausgeprägten Radial- und Randklüften (a) und (b). Letztere weisen eigene Federstrukturen auf (Kalkstein-Steinbruch in Drewer/Sauerland)

c) Randklüfte (Abb. 18 - 19): Diese setzen häufig die Federstrukturen oder Radialklüfte fort und sitzen am äußersten Ende der Kluftperipherie in mehr oder weniger parallelen Lagen. Die Randklüfte sind im Verhältnis zur Hauptkluft und zu den Radialklüften immer klein und gehen entweder ohne scharfe Abgrenzung aus der Hauptkluftfläche hervor - wobei sie dann noch zur jeweiligen Hauptkluftfläche gerechnet werden - oder sind durch einen Kluftknick oder eine Ringstruktur von der Hauptkluftfläche getrennt (Abb. 15, S. 32).

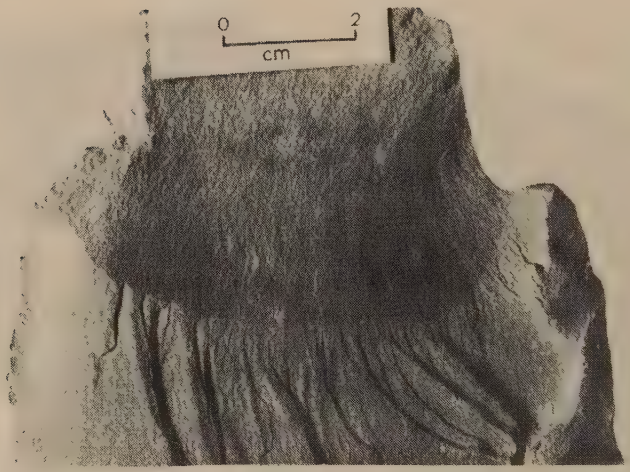


Abb.19 Teil einer Kluftfläche mit Randklüften, die aus den Federstrukturen direkt entwickelt worden sind. Keine Radialklüfte vorhanden (Kalkstein-Steinbruch in Drewer/Sauerland)

d) Stirnflächen (Abb. 15 und 17): Diese begrenzen Rand- und Radialklüfte an ihren Längsseiten. Meist entstehen sie an einem Kluftknick (Abb. 15), durch den sie von der Hauptkluft getrennt werden oder sie entwickeln sich vor dem Kluftknick aus einem "winzigen Wulst" (BANKWITZ, 1965 a) eines Besens.

Die Stirnfläche beginnt mit einem spitzen Winkel. Ihre Höhe nimmt im allgemeinen vom mm-Bereich, im weiteren Verlauf, bis zum cm-Bereich zu.

e) Ringstrukturen und Kluftknicke (Abb. 15 und 20):

Ringstrukturen: Kreis- bis ellipsenförmig verlaufende Flächenteile zwischen zwei Kluftknicken, ausgebildet als flache, zonale Streifen. Von einer gewissen Breite an vervollständigen sich Ringstrukturen zu Kluftknicken, welche mehr oder weniger als leicht geneigte, ebene Flächen vorkommen. Beide Kluftstrukturen treten meist mehrfach parallel hintereinander auf, am häufigsten auf einer Hauptkluft in Gestalt von konzentrischen Ellipsen oder am Rand der Hauptkluft, deren Grenzverlauf sie nachzeichnen (Abb. 20).

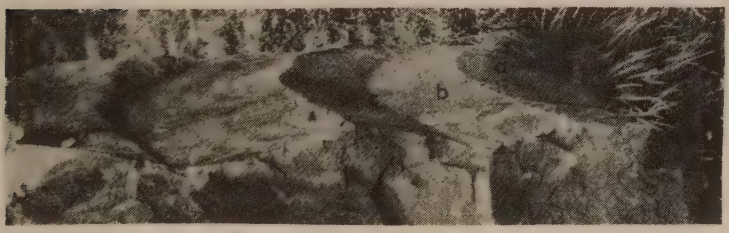


Abb. 20 Front einer Kluftfläche (a), gekennzeichnet durch mehrere Kluftknicke (b) und Ringstrukturen (c) (aus PRICE, 1966)

4.5 Schichtung

Bisher ist nur wenig zum Ausdruck gekommen, welchen entscheidenden Einfluß die Schichtung auf die Art und das Ausmaß der Durchtrennung in geschichteten Sedimentgesteinen hat. Schichtfugen sind meist weiträumig durch das Gebirge streichende flächige Elemente, die sich in regelmäßigen, meist jedoch in unregelmäßigen Abständen wiederholen. Sie bilden daher häufig auch den Hauptbestandteil des Trennflächengefüges in geschichteten Sedimentgesteinen.

Eine zweite Geländebeobachtung ist ebenso wichtig: Die meisten der untersuchten Sedimentgesteine bestehen aus einer ausgeprägten Wechsellagerung von kompetenten und inkompetenten Schichten wie Sand- bzw. Kalk-/Tonsteinserien. Selbst kompetente Gesteinslagen, die auf den ersten Blick als einheitlich erscheinen, haben in ihren Schichtfugen häufig dünne Tonstein- oder Mergeleinlagerungen (Abb. 21). Die überwiegende Anzahl der im Gelände beobachteten, normal zu den Schichtfugen stehenden Haupt- und Nebenklüfte sind auf eine einzige Gesteinsschicht begrenzt und

Abb. 21 Kompetente Gesteinslage (Sandstein) mit dünnen Tonsteineinlagerungen (Straßenschnitt bei Katafourkon NW Griechenland)

zeigen eine größere Längenerstreckung parallel zu den Schichtflächen. Durchsetzen die Klüfte gelegentlich mehrere Gesteinslagen gleichzeitig, dann werden diese stets an inkompetenten Schichten eingehalten. In den letzteren sind die Klüfte oft selbständig entwickelt. Wenn auch weniger straff geregelt, sind die Klüfte hier häufiger als in den meist mächtigeren kompetenten Gesteinslagen. Ferner sind die Klüfte ihrer geometrischen Form nach in den kompetenten feinkörnigen Gesteinslagen deutlicher erkennbar und ihre Flächenstrukturen besser ausgebildet als in den inkompetenten Schichten. Abb. 22 zeigt eine Kluftfläche,

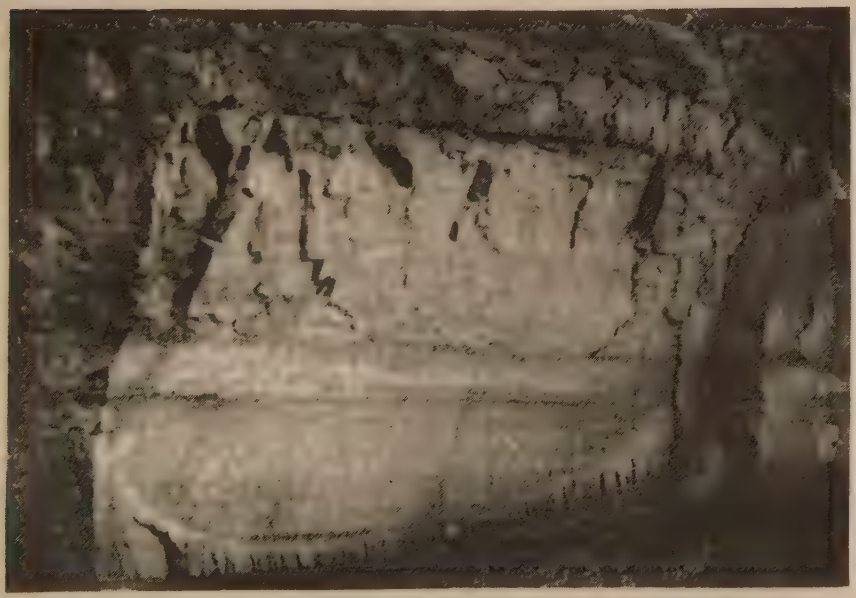


Abb 22 Unterschiedliche Ausbildung einer Kluftfläche in inkompetenten und in kompetenten Gesteinslagen (Steinbruch H. Rauen in Witten-Gedern)
AB: 4,66 m

deren untere Partie in quarzreichem Sandstein und deren obere Partie in Tonstein ausgebildet ist. Während ihre geometrische Form und ihre Flächenstrukturen im Sandstein recht gut ausgebildet sind, werden diese nach dem Übergang in die inkompetente Tonsteinschicht undeutlicher und gröber.

5. KRITISCHE BETRACHTUNGEN

5.1 Zu den bestehenden Konzeptionen

Die in Kap. 3 dargestellten Konzeptionen zur Erfassung des Durchtrennungsgrades sind unter zwei Gesichtspunkten grundsätzlich zu kritisieren: Einmal in ihren Definitionen des Durchtrennungsgrades, zum anderen in ihrem Vorgehen zur Bestimmung dieses Parameters im Gelände. Als Grundlage zu diesen kritischen Betrachtungen werden die in Kap. 4 bereits dargestellten Geländebeobachtungen herangezogen.

5.1.1 Definitionen

Die Formulierung des "ebenen Durchtrennungsgrades" nach der PACHER'schen Grundkonzeption (Kap. 3.2.1) - und das gilt auch für die "Verwandten Konzeptionen" (Kap. 3.2.2) - geht von einer modellhaften, unendlich straff geregelten Anordnung des Kluftflächengefüges aus, wonach mehrere nicht durchstreichende Klüfte in einer gedachten ebenen Schnittfläche anfallen können (Abb. 2, S. 8).

Eine solche Anordnung der Klüfte ist in der Natur jedoch äußerst selten zu finden, wenn man von Schichtfugen oder durchstreichenden Klüften absieht. In Wirklichkeit streuen die Kluftstellungen - auch bei straff geregelten Kluftscharen - und bewirken somit, daß bestenfalls nur vereinzelt mehrere Kluftflächen in einer "Fast-Ebene" anfallen können. Bei weiter wachsender Streuung der Kluftstellungen verstärkt sich dieser Effekt und kann dazu führen, daß die Annahme solcher ebenen oder "fast-ebenen" Schnittflächen überhaupt nicht möglich ist (Abb. 23).

Abb. 23 a) natürliche Anordnung von Klüften
b) idealisierte - bzw. Zeilenanordnung von Klüften nach der PACHER'schen Grundkonzeption

Nach MONAHAN (1963) bewirkt die wegen der Streuung der Kluftstellungen entstehende gegenseitige Überschneidung der Klüfte einer Schar, daß der in gedachten ebenen Schnittflächen des Gesteins zu ermittelnde Durchtrennungsgrad nicht für den gesamten untersuchten Gesteinsbereich repräsentativ ist. Vielmehr, so meint MONAHAN, sollte bei beträchtlicher Streuung der Kluftstellungen der Wert $\varkappa_e = 1{,}0$ als konservative Annäherung für den Durchtrennungsgrad angenommen werden.

Bezüglich der Bruchfortpflanzung setzt die dem "ebenen Durchtrennungsgrad" zugrundeliegende Definition stillschweigend voraus, daß die Kluftflächen sich in ihrer Kluftebene vergrößern, zusammenschließen und schließlich ebene Bruchflächen bilden. Dieses trifft in den meisten Fällen jedoch nicht zu.

Denn die durch Schichtfugen und sonstige bereits vorhandene Trennflächen bedingte Gesteinsanisotropie (vgl. Kap. 4.5) bewirkt, daß es im Falle des Neubruchs bei Beanspruchungen nur selten zur Vereinigung mehrerer in einer Ebene liegender Klüfte kommt. Dagegen treten in der Regel "staffelförmige" Bruchflächen auf (Abb. 24).

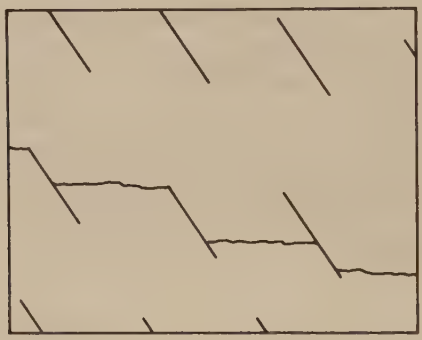


Abb. 24 Modell eines "Staffelbruchs"
(nach K. MÜLLER, 1974)

Die Formulierung der "Scher"- und "Zug"-Koeffizienten der "Klüftungskontinuität" in bezug auf mögliche Bruchflächen in der Felsmasse ("Südafrikanische" Konzeption) (Kap. 3.2.3 und Abb. 8) stellt ohne Zweifel den bisher vollkommensten Versuch zur Erfassung des Durchtrennungsgrades dar. Geometrisch setzt das dieser Formulierung zugrundeliegende Gedankenmodell eine straffe Regelung und eine inhomogene Verteilung der Klüfte voraus, welche in erster Näherung mit der tatsächlichen Anordnung der Klüfte im Gebirge übereinstimmt.

Bruchmechanisch setzt es neben dem ebenen auch ein staffelförmiges Fortreißen des Neubruchs von Kluft zu Kluft voraus, welches einer der häufigsten Bruchformen in geklüfteten Gesteinen entspricht (L. MÜLLER, 1958a; auch Abb. 27, S. 56).

Die Anwendung dieser Konzeption in der Praxis stößt jedoch auf sehr große Schwierigkeiten: Die Ermittlung der räumlichen Geometrie des Kluftflächengefüges anhand von Wahrscheinlichkeitsberechnungen erweist sich als mangelhaft. Diese geben keine Anhaltspunkte für Ort und Richtung der zu erwartenden Bruchflächen, zumindest wenn der künftige Beanspruchungsplan nicht bekannt ist; geschweige denn ist die Betrachtung von Klüften und möglichen Bruchflächen als lineare Größen für Problemstellungen der Praxis geeignet. Auch für die Festlegung der Form der möglichen Bruchflächen - und davon abgeleitet - ihrer Zusammensetzung ist entscheidend, welche und wieviele Materialbrücken noch in "Scher-" und "Zug-"Richtung durchreißen können. Die Ermittlung dieser Zahl im Gelände macht die meisten Schwierigkeiten und setzt die Kenntnis des zukünftigen Bruchvorganges in der Felsmasse zum Zeitpunkt der Erkundung voraus.

Die in den experimentellen Konzeptionen vorgeschlagenen Möglichkeiten der Neuformulierung des Begriffs "Durchtrennungsgrad" (Kap. 3.3) beschränken sich grundsätzlich auf eine geometrisch-statistische Beschreibung von einscharigen Kluftflächengefügen in ebenen Schnittflächen, welche normal zu den Klüften stehen. In allen drei Konzeptionen wird weder der Weg einer unmittelbaren Realisierung im Gelände gezeigt noch fehlt jede Angabe, in welcher Form die zu ermittelnden Größen als Eingangsdaten für den Durchtrennungsgrad in Ingenieurberechnungen eingesetzt werden können. Die Zusammenhänge der in diesen Konzeptionen beschriebenen Verfahren und der eigentlichen Erfassung des Durchtrennungsgrades sind vage. Aus diesen Gründen erweisen sich diese Konzeptionen bezüglich der Erfassung des Durchtrennungsgrades im Gelände als unzureichend und für Problemstellungen der Praxis kaum anwendbar.

5.1.2 Bestimmung im Gelände

Die Ermittlung der mit dem Durchtrennungsgrad zusammenhängenden wichtigsten Eingangsdaten im Gelände - insbesondere der Raumstellung und der Flächengröße von Klüften - geschieht in sämtlichen aufgestellten Konzeptionen anhand von in Stollen, Tunneln und Kavernen (ggf. auch in freien Felsoberflächen) sichtbaren Kluftausbissen. Dieses Vorgehen ist jedoch, trotz seiner Zweckmäßigkeit mit folgenden Nachteilen behaftet: Kluftausbißenden sind meist schwer erkennbar, häufig sogar sind nicht beide Enden eines Kluftausbisses in den Wandungen des Erkundungsstollens enthalten (Abb. 25). Ferner bietet allein die meßbare Ausbißlänge einer Kluft im Erkundungsstollen oder an der freien Felsoberfläche nur einen geringen Anhalt über die tatsächliche oder vermutliche Erstreckung dieser Kluftfläche im Gesteinsinnern. Die zu diesem Zweck oft getroffene Annahme, die Kluftflächen hätten eine quadratische oder kreisförmige Konfiguration (vgl. Kap. 3) trifft, zumindest für die Klüfte des "fundamentalen Kluftsystems" von Sedimentgesteinen, in vielen Fällen nicht zu (vgl. Kap. 4.4).

Auch können die Genauigkeit bei der Ermittlung der Raumstellung und, davon abgeleitet, die Klassifizierung der Klüfte in eine oder mehrere Kluftscharen anhand ihrer Ausbisse in Erkundungsstollen von der Lokalität und den Dimensionen des Erkundungsstollens weitgehend beeinträchtigt werden. Dieses wird am Beispiel der Abb. 25, in welcher aus Übersichtlichkeitsgründen die Unebenheit und Erstreckung der abgebildeten Kluft gegenüber der Böschung überdimensional dargestellt sind, deutlich gezeigt.

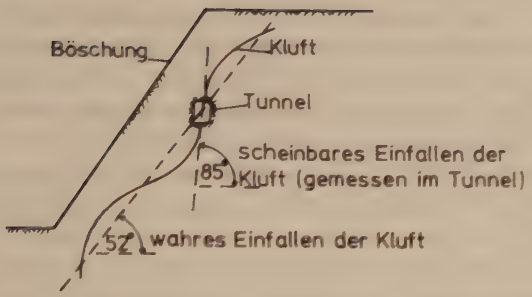


Abb.25 Illustration von häufig auftretenden Meßfehlern bei der Messung des Einfallens von relativ unebenen Großklüften in Erkundungsstollen nach PITEAU, 1973

Bei der anschließenden rechnerischen Bestimmung der "Durchtrennungsgrade" werden dann, mittels einer statistischen Auswertung, Mittelwerte erhoben, die - mit Ausnahme der Konzeption von HEITFELD und HESSE (1974) - nicht erkennen lassen, ob sie aus zahlreichen kleinen Klüften oder aber aus wenigen großen, mechanisch ganz anders zu deutenden Klüften zustandegekommen sind (vgl. auch K. MÜLLER, 1974). Von der Verwendung eines solchen statistisch berechneten, gemittelten Wertes für den Durchtrennungsgrad muß nach WERNER (1970) schon deshalb abgeraten werden, "weil dieser ungünstige Extremwerte verschleiert und somit in Stabilitätsuntersuchungen nicht vorhandene Sicherheiten vortäuscht."

5.2 Zum Begriff "Durchtrennungsgrad"

5.2.1 Vorüberlegungen

Wie aus den bereits gemachten Ausführungen hervorgeht, muß eine geometrische Beschreibung des Durchtrennungsgrades nicht zweckfrei sein. Vielmehr muß diese, um den Einfluß des Trennflächengefüges auf Festigkeit und Verformbarkeit von Gebirgssystemen zuverlässig zu beschreiben, auf die Betrachtung mechanischer Gesichtspunkte ausgerichtet sein. Die Notwendigkeit solch einer mechanisch fundierten geometrischen Beschreibung des Durchtrennungsgrades wird noch durch folgende Überlegungen tendenzmäßig unterstützt: Betrachtet man die von L. MÜLLER (1963) entwickelten und von BOCK (1971) erweiterten Modelle von Kluftkörperverbänden (Abb. 26), so stellt man zunächst fest, daß

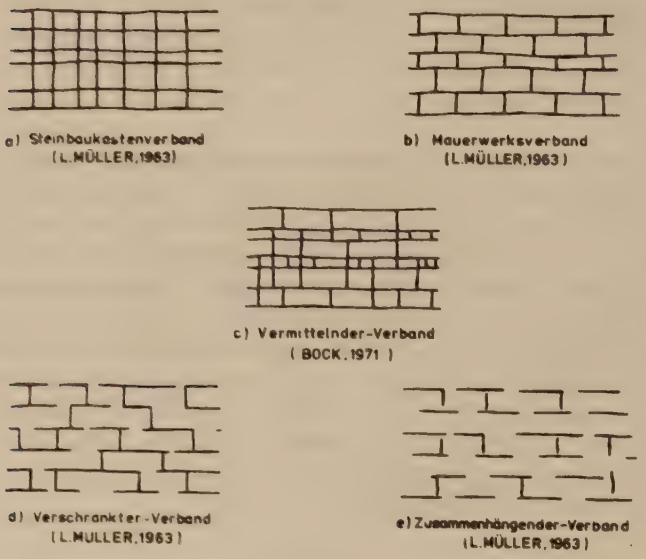


Abb.26 Modelle von Kluftkörperverbänden

Betrachtungen über das Trennflächengefüge in geschichteten Sedimentgesteinen grundsätzlich einen "Steinbaukastenverband" oder einen "Mauerwerksverband" oder aber einen "vermittelnden Verband" voraussetzen. In allen drei dieser geometrischen Modelle des Trennflächengefüges soll die Realisierung der bereits angelegten Kluftkörper praktisch als vollständig angesehen werden ("Vielkörpersystem" nach L. MÜLLER, 1963). Danach soll von einem theoretischen Maximalwert von $\varkappa = 1{,}0$ für den Durchtrennungsgrad in geschichteten Sedimentgesteinen ausgegangen werden, vorausgesetzt, daß der Neubruch bei Beanspruchungen im wesentlichen durch Zergleiten entlang von vorgegebenen, mehr oder minder durchstreichenden Trennflächen stattfindet. Diese Vorstellung über den Bruchvorgang trifft für ein wirkliches "Vielkörpersystem" in erster Näherung zu, denn angesichts der vollständigen Realisierung der Kluftkörper stehen der Bruchfortpflanzung im theoretischen Fall keine Materialbrücken im Wege. Vielmehr ist dabei der "Winkel, unter welchem der Kraftfluß auf die Kluftflächen auftritt ... theoretisch ... das allein entscheidende" (L. MÜLLER, et al., 1973)

Je größer der Kluftkörper bzw. die Weitständigkeit des Trennflächengefüges oder je geringer die Realisierung des Kluftkörpers wird, desto mehr geht das "Vielkörpersystem" in ein "Mehrkörpersystem" (L. MÜLLER, 1963) über. In diesem ("Verschränkter und Zusammenhängender Verband"; z. B. massige Sedimentgesteine) ist die Annahme eines Maximalwertes von $\varkappa = 1{,}0$ für den Durchtrennungsgrad nicht mehr realistisch. Denn hier sind im Falle des Neubruchs noch die rund um die einzelnen Kluftkörper verbliebenen Materialbrücken oder zusätzlich noch einige der Kluftkörper aufzureißen oder durchzuscheren. Für Anzahl und Größe der zu überwindenden Materialbrücken sind hierbei neben dem Realisierungsgrad der Kluftkörper noch die Richtung und die Größe der zu erwartenden Beanspruchung ausschlaggebend.

Diese Überlegungen besagen, daß der Durchtrennungsgrad eines Gesteinskörpers nicht nur von dem Ausmaß und der Verteilung der vorhandenen Trennflächen allein, sondern auch vom künftigen Beanspruchungsplan abhängt. Diese doppelte Abhängigkeit des Durchtrennungsgrades bedingt, daß seine genauere Bestimmung im Gelände erst dann möglich ist, wenn die räumliche Geometrie des Trennflächengefüges ermittelt werden kann und ihr mögliches Zusammenwirken mit dem künftigen Beanspruchungsplan, d. h. der zu erwartende Bruchvorgang, vorausgesagt werden kann.

5.2.2 Räumliche Geometrie des Trennflächengefüges

Die durchgeführten Geländeuntersuchungen zeigen, daß ein Modell zur Erfassung der räumlichen Geometrie des Trennflächengefüges in Sedimentgesteinen den entscheidenden Einfluß der Schichtung berücksichtigen muß. Als maßgebend für ein solches Modell sollte ein wechselgeschichteter, inhomogener Gesteinskörper betrachtet werden, dessen Trennflächengefüge aus Schichtfugen und Klüftung zusammengesetzt ist, und in welchem bezüglich der geometrischen Eigenschaften der Klüfte nicht mit statistischer Homogenität gerechnet werden kann. Die Ermittlung von Anzahl, Erstreckung und Häufigkeit der Klüfte in einem solchen Gesteinskörper ist mit großen Schwierigkeiten verbunden: In günstigen, aber genügend häufigen Fällen (z. B. in kompetenten, wenig oder überhaupt nicht verwitterten Gesteinspartien) kann man Form und Größe der Klüfte in Aufsicht sehen, meist allerdings jedoch nur die Schnittlinien von Kluftebenen (Kluftausbisse) mit der jeweiligen Felsoberfläche. Letztere bieten angesichts der in Kap. 4.4 dargestellten Geländebeobachtungen jedoch nur einen geringen Anhalt über die tatsächlichen Kluftflächengrößen. Auch hat man sich bei der Gefügeaufnahme im Gelände noch zu

vergegenwärtigen, daß in einem Aufschlußbereich unmittelbar hinter der Wand bereits wieder Klüfte einsetzen können, deren geometrische Eigenschaften weder durch direkte noch durch indirekte Aufschlußmethoden (z. B. geophysikalische Erkundungsverfahren, Bohrungen, optische- und Fernsehrsonden) hinreichend genau erfaßt werden können.

Aus allen diesen Gründen erweist sich die Erfassung der räumlichen Geometrie des Trennflächengefüges im Gelände als sehr schwierig und setzt, angesichts der meist mangelhaften Aufschlußverhältnisse einen für viele Felsbauprojekte organisatorisch und finanziell nicht zu vertretenden Aufwand voraus.

5.2.3 Bruchvorgang

Nach L. MÜLLER (1966) wird grundsätzlich in "fünf möglichen und beobachteten Arten der Ausbildung von Bruchflächen und -zonen in geklüfteten Medien" unterschieden (Abb. 27). Je nach Orientierung der angezielten Bruchfläche Φ_1 zu den Richtungen der vorhandenen Trennflächenscharen wird sich dabei der Bruchvorgang im wesentlichen an Trennflächen halten, die entweder einer (Fall c und Fall d) oder mehreren Trennflächenscharen (Fall e) angehören (Fall f, nur bei Vorhandensein latenter Spaltbarkeit meist in Richtung ausgeprägter Kluftscharen).

Die Bestimmung des Bruchvorgangs im Gelände ist mindestens genau so problematisch wie die des Durchtrennungsgrades selbst: Der Bruchvorgang in einem geklüfteten Gesteinskörper kann, so meinen L. MÜLLER und GÖTZ (1973), von keiner der gegenwärtig bestehenden Bruchtheorien exakt beschrieben werden. Darüber hinaus setzt seine Vorhersage im Gelände einmal voraus, daß die räumliche Geometrie des Trennflächengefüges hinreichend genau erfaßt werden kann, zum anderen, daß der künftige Beanspruchungsplan zur Zeit der Gefügeaufnahme bekannt ist.

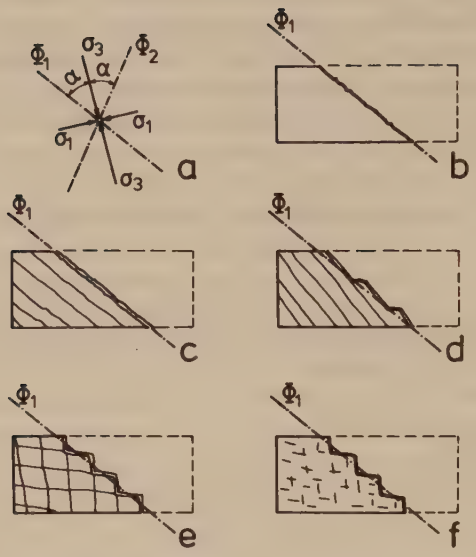


Abb.27 Bruchformen in zerklüftetem Gestein

a) Spannungszustand σ_1 σ_3 und von diesem angezielte Bruchflächen Φ_1, Φ_2
b) Neubruch durch unversehrtes Gestein
c) Gleitung entlang vorhandener Fuge
d) Bruchstaffel
e) Kluftstaffel
f) Vertretungskluft

(nach L. Müller, 1966)

Diese Voraussetzungen werden in der Praxis jedoch selten erfüllt, und zwar aus folgenden Gründen:

- die Erfassung der räumlichen Geometrie des Trennflächengefüges ist, wie in Kap. 5.2.2 bereits dargestellt, mit sehr großen Schwierigkeiten verbunden,
- der künftige Beanspruchungsplan ist zur Zeit der ingenieurgeologischen Erkundungsphase eines Felsbauprojektes nur selten und dann auch nur in seiner Größenordnung bekannt.

5.3 Zusammenfassende Diskussion und Folgerungen

Die Ergebnisse und Folgerungen dieser kritischen Betrachtungen können wie folgt zusammengefaßt werden:

- die heute bestehenden Konzeptionen sind, soweit sie die Aufgabe nach einer der Forderungen der Felsbaupraxis hinreichenden Erfassung des Durchtrennungsgrades gelöst haben, unzureichend. Allen diesen Konzeptionen ist praktisch gemeinsam, daß eine auf mechanisch einwandfreiem Wege zustande gekommene geometrische Beschreibung des Durchtrennungsgrades nicht existiert. Die bestehenden Konzeptionen bauen vielmehr auf mangelhaften geometrischen und statistischen Analogien auf. Soweit sie trotzdem den Versuch einer mechanischen Fundierung erfahren (z. B. Kap. 3.2.3), treten unübersehrbare Schwierigkeiten bei der Anwendung dieser Konzeptionen im Gelände auf,

- die Untersuchung der Problematik des Begriffs "Durchtrennungsgrad" zeigte, daß der Durchtrennungsgrad in Sedimentgesteinen nicht als ein konstanter, sondern vielmehr als ein variabler Parameter betrachtet werden muß, dessen Größe vom möglichen Zusammenwirken der räumlichen Geometrie des Trennflächengefüges und des künftigen Beanspruchungsplanes, d. h. von dem zu erwartenden Bruchvorgang, bestimmt wird. Angesichts unserer eingeschränkten Möglichkeiten, die räumliche Geometrie des Trennflächengefüges und den möglichen Bruchvorgang zuverlässig zu ermitteln, erscheint daher auch die exakte Bestimmung des Durchtrennungsgrades im Gelände hoffnungslos.

Nach diesen Festlegungen bietet sich der Felsbaumechanik gegenwärtig folgende Alternative hinsichtlich des Parameters "Durchtrennungsgrad":

a) Verzicht auf den Anspruch der vollkommenen Erfassung wie auch der Verwendung des Durchtrennungsgrades; diesem soll lediglich der Wert eines Gedankenmodells zuerkannt werden.

b) Abschätzung des Durchtrennungsgrades auf der Grundlage von partiellen Beobachtungen.

Eine von LAJTAI (1969) vertretene weitere Möglichkeit der rein intuitiven Ermittlung des Durchtrennungsgrades istdeshalb unzuverlässig, weil diese weitgehend subjektiv und dem Zufall überlassen ist. Sie kann zwar für eine rohe Abschätzung des Durchtrennungsgrades im Gelände zu Hilfe genommen werden, ihre Ergebnisse dürfen jedoch nicht ohne weiteres in Festigkeits- und Stabilitätsuntersuchungen eingesetzt werden, da sie nicht vorhandene Sicherheiten vortäuschen können.

Im Hinblick auf die Beibehaltung des "Durchtrennungsgrades" als einsatzfähigem Parameter in der Felsbaumechanik,stellt die vorstehende zweite Möglichkeit eine Kompromißlösung dar. Sie besteht darin, anhand von ingenieurgeologischen Methoden und für Ingenieurberechnungen in geologisch und geometrisch definierten Einzelfällen die Abschätzung eines mechanisch bedingten Wertebereiches (d. h. obere und untere Grenze) für den "Durchtrennungsgrad" zu ermöglichen. Entsprechend wurde in vorliegender Arbeit verfahren.

6. ZUR INGENIEURGEOLOGISCHEN ABSCHÄTZUNG DES DURCHTRENNUNGSGRADES

6.1 Grundsätzliche Überlegungen

Nach den in Kap. 5.3 bereits angestellten Überlegungen soll für den Durchtrennungsgrad in Sedimentgesteinen ein mehrere Trennflächenscharen berücksichtigender oberer Grenzwert von $\alpha = 1{,}0$ angenommen werden. Darüber hinaus kann ein unterer Grenzwert durch eine auf die Betrachtung des Bruchvorganges ausgerichtete Abschätzung des mechanisch wirksamen "Durchtrennungsgrades" von einzelnen potentiell gefährlichen Kluftscharen im Gelände bestimmt werden.

In den meisten Fällen ist zur Zeit der geotechnischen Gefügeaufnahme im Gelände der künftige Bruchvorgang nicht bekannt. In günstigen, aber genügend häufigen Fällen kann man nur die Endgestalt der Bewegungsvorgänge (Bruchfläche) sehen. Eine sichtbare natürliche oder künstlich erzeugte Bruchfläche als statische Abbildung eines vorausgegangenen Bruchvorganges erlaubt in gewisser Weise aus der Geometrie ihrer Reliefs Aussagen über den mechanisch wirksamen Durchtrennungsgrad von einzelnen, potentiell gefährlichen Kluftschaften zu machen, sofern die Aufschlußbedingungen die Geländeaufnahme und die Deutung des Reliefs dieser Bruchfläche ermöglichen.

Die nach diesem Vorgehen zu ermittelnden Werte für den Durchtrennungsgrad von einzelnen, potentiell gefährlichen Kluftscharen sind in Abhängigkeit von der jeweils vorausgegangenen Beanspruchung und der Mitwirkung von sonstigen vorgegebenen Trennflächenscharen zu verstehen. Diese können jedoch im Hinblick auf Problemstellungen der Praxis als untere Grenzwerte betrachtet werden, die angeben, inwieweit diese Kluftscharen für bestimmte Beanspruchungen zur Bildung von Bruchflächen "benutzt" werden können. Folglich unterscheidet sich dieses Vorgehen zur Bestimmung des Durchtrennungsgrades von den bisherigen Konzeptionen darin, daß in diesem der Durchtrennungsgrad

nicht geometrisch - deskriptiv durch die statistische Erfassung von in beliebigen Aufschlüssen sichtbaren Kluftausbissen einer Schar, sondern durch die Erfassung des gefügebedingten Verlaufs von bereits vorhandenen natürlichen und künstlichen Bruchflächen in der Felsmasse, abgeschätzt wird (Abb. 28).

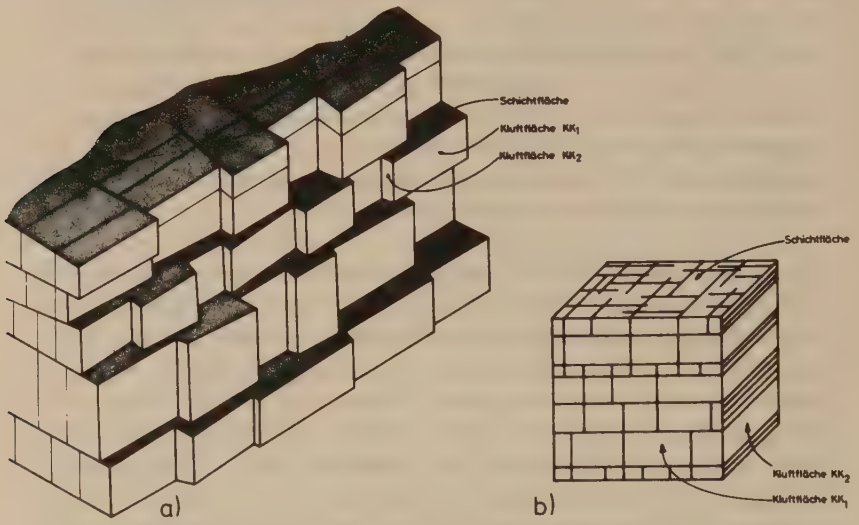


Abb. 28 Illustration der unterschiedlichen Vorgangsweise zur Beschreibung des Durchtrennungsgrades
a) eigene Konzeption
b) derzeitige Konzeptionen
Erklärung s. Text

Wegen seiner Anwendbarkeit nur unter bestimmten Aufschlußbedingungen soll dieses Vorgehen als ein Sonderfall zur Verbesserung der Abschätzungsmöglichkeiten des Durchtrennungsgrades im Gelände gesehen werden. Auch wegen ihrer Abhängigkeit von den lokalen geologischen Verhältnissen und der Entstehungsgeschichte der untersuchten Aufschlußoberflächen haben dieses Vorgehen und seine Ergebnisse nur begrenzten theoretischen Wert im Sinne einer allumfassenden physikalisch-technologischen Lösung.

6.2 Aufschlußbedingungen

a) Bereiche, welche in geologischer und struktureller Beziehung homogen sind, sollen in einer Felsmasse definiert werden können.

Aus der in Kap. 4 bereits dargestellten Abhängigkeit der mit der Erfassung des Durchtrennungsgrades zusammenhängenden geometrischen Parameter der Klüftung von den (örtlich abweichenden) physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Gesteine ergibt sich die Einschränkung, daß diese bestenfalls in einzelnen Bereichen der Felsmasse erfaßt werden können, welche in geologischer und struktureller Beziehung homogen sind. Die Größenordnung dieser Homogenbereiche wird von den geologischen Gegebenheiten bestimmt: In Gebieten mit nahezu horizontal liegenden, tektonisch kaum oder überhaupt nicht beanspruchten Sedimentgesteinen können diese Homogenbereiche sehr groß sein; umgekehrt kommen in Gebieten mit abweichender Lagerung des Gesteins sowie in tektonisch stark gestörten oder gefalteten Gesteinen nur solche Bereiche in Betracht, in denen der Einfluß der Tektonik auf das Trennflächengefüge möglichst gering ist (z. B. Faltenflügel oder Liegendes und Hangendes von Störungen).

Für die Festlegung von Homogenbereichen im Gelände sind daher sowohl die weitgehende Erkundung der geologischen Gegebenheiten als auch eine Analyse der Klüftung im Hinblick auf die jeweils vorliegenden Kluftscharen erforderlich.

b) Natürliche oder steile, künstlich erzeugte freie Felsoberflächen, welche überwiegend in Richtung der meist gut ausgebildeten Kluftschar angelegt worden sind, sollen in einem Homogenbereich existieren.

Grundlegende Aufschlußbedingungen für die Abschätzung des mechanisch wirksamen Durchtrennungsgrades von einzelnen, potentiell gefährlichen Kluftscharen in einem Homogenbereich

ist die Existenz von natürlichen oder künstlichen freien Felsoberflächen, die überwiegend in der Richtung der meist gut ausgebildeten Kluftschar ("Hauptkluftschar") angelegt worden sind und eine große Anzahl von Kluftflächen dieser Schar enthalten. Entscheidend für die Aussagegültigkeit der zu ermittelnden Werte für den effektiven Durchtrennungsgrad an solchen Aufschlußoberflächen ist, inwieweit ihre Reliefs als mögliche Bruchformen in der Felsmasse betrachtet werden können: Die Sicherheiten von natürlichen durch Eigengewicht entstandenen Felsoberflächen sind meist nicht sehr groß und ihr Standsicherheitskoeffizient kann, nach L. MÜLLER (1964), in der Regel als gleich 1,0 angenommen werden (Grenzgleichgewicht). Die bei der Untersuchung von natürlichen Felsoberflächen erhaltenen Werte für den mechanisch wirksamen Durchtrennungsgrad sind daher weniger konservativ als die von künstlich erzeugten Felsoberflächen, für welche das Grenzgleichgewicht - durch den "man-made" Faktor bedingt - nicht immer erreicht wird. Nach diesen Gesichtspunkten sind , im Hinblick auf die Abschätzung von möglichst zuverlässigen Werten für den mechanisch wirksamen Durchtrennungsgrad von den künstlichen Felsoberflächen nur steile, einheitlich entstandene zu untersuchen (z. B. durch Sprengen), die sich dem Grenzgleichgewicht annähern.

c) Die Kluftflächen seien erkennbare Merkmale einer Aufschlußoberfläche und können quantitativ erfaßt werden.

Voraussetzung für die geometrische Erfassung des Reliefs von natürlichen und künstlich erzeugten Aufschlußoberflächen ist, daß vorgegebene Kluftflächen erkennbare Merkmale dieser Reliefs darstellen, und daß ihre geometrischen Parameter wie Raumstellung und -lage, Flächengröße und Abstand quantitativ erfaßt werden können. Angesichts der in Kap. 4 dargestellten Beobachtungen wird diese Bedingung grundsätzlich bei

Aufschlußoberflächen von nahezu einheitlich geschichteten oder wechselgeschichteten Sedimentgesteinen erfüllt, wo die kompetenten Gesteinslagen (z. B. Sandsteine, Kalke) gegenüber den inkompetenten (z. B. Tonsteine, Mergel) überwiegen. Für die Unterscheidung von vorgegebenen Kluftflächen und sekundär entstandenen Trennflächen (d. h. aufgerissenen und durchscherten Materialbrücken, z. T. durch Sprengen) in diesen Aufschlußoberflächen werden grundsätzlich folgende Merkmale betrachtet:

a) die Oberfläche von sekundär entstandenen Kluftflächen weist keine Kluftbeläge aus Kluftausfüllungen, Kristallrasen oder Eisenoxyd auf, welche die Kluftwandungen von vorgegebenen Kluftflächen mitunter kennzeichnen (Abb. 29).

Abb. 29 Unterscheidung einer vorgegebenen (a) und einer sekundär entstandenen (b) Kluftfläche aufgrund ihrer Oberflächenbeschaffenheit (Kalkstein-Steinbruch in Anröchte / Sauerland)

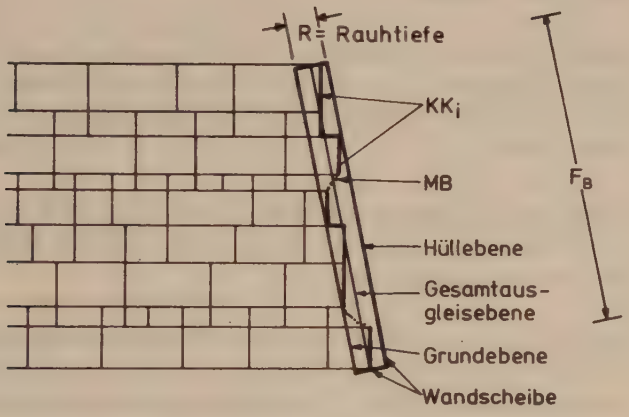
b) sekundär entstandene Kluftflächen sind nicht systematisch ausgebildet, sondern treten nur vereinzelt auf. Sie sind in der Regel viel unebener als vorgegebene, natürliche Kluftflächen.

6.3 Konzeption

Für eine sinnvolle Beschreibung des mechanisch wirksamen bzw. "effektiven Durchtrennungsgrades" einer Hauptkluftschar in einer natürlichen oder künstlich erzeugten Aufschlußoberfläche ist es angesichts der Abhängigkeit des Durchtrennungsgrades vom Zusammenspiel mehrerer vorgegebener Trennflächenscharen (s. Kap. 5.3) notwendig, daß aus dieser Beschreibung Aussagen über den effektiven Kluftflächenanteil der Hauptkluftschar an der Aufschlußoberfläche gemacht werden können, und daß die Abhängigkeit dieser Aussagen vom Zusammenspiel sonstiger vorgegebener Trennflächenscharen abzulesen ist. Die zu diesem Zweck in nachstehender Konzeption gegebene Darstellungsweise besteht in der Abschätzung des "effektiven Durchtrennungsgrades" auf der Grundlage der "Makrorauhigkeit" des Reliefs der jeweils untersuchten Aufschlußoberfläche. Die Wahl dieser Darstellungsweise geht auf die Betrachtung zurück, daß je ebener die Aufschlußoberfläche ist, desto mehr wird sie von der untersuchten Hauptkluftschar dominiert bzw. desto geringer wird der Beitrag sonstiger vorgegebener Trennflächenscharen zu ihrer Gestaltung und umgekehrt.

Abb. 30 illustriert diese Konzeption für den Fall einer Aufschlußoberfläche, die ungefähr in der Richtung einer im Gelände vorkommenden Hauptkluftschar angelegt worden ist (= normal zur Bildebene). Für die Beschreibung der "Makrorauhigkeit" und, davon abgeleitet, für die Abschätzung des "effektiven Durchtrennungsgrades" der Hauptkluftschar in dieser Aufschlußoberfläche werden nachstehend gegebene Begriffe und Kennwerte verwendet. Einige von diesen werden in ähnlicher Weise auch in

der technischen und geologischen Literatur für die Beschreibung der Mikrorauhigkeit benutzt (RENGERS, 1971; dort weitere Literatur).



KK_i = Hauptklüfte
MB = aufgerissene oder durchscherte Materialbrücken

Abb. 30 Seitenansicht einer Aufschlußoberfläche und Erläuterung ihrer Makrorauhigkeitskennwerte

a) Relief: Begrenzung des untersuchten Meßbereichs, durch die dieser vom umgebenden Raum getrennt wird. Das Relief setzt sich im wesentlichen aus Kluftflächen der untersuchten Hauptkluftschar sowie aus Trennflächen sonstiger vorgegebener Trennflächenscharen und aus sekundär entstandenen Trennflächen (bzw. aufgerissenen oder durchscherten Materialbrücken) zusammen.

b) Gesamtausgleichsebene: Mittlere bzw. ausgleichende Ebene des gesamten Reliefs. Diese wird nach einem bestimmten Kriterium (s. ANHANG A) so angelegt, daß der Raumanteil des Reliefs über dieser Ebene gleich groß dem Anteil ist, der unter der Ebene fehlt. Diese Ebene wird auch kurz "GAE" genannt.

c) Bezugsfläche F_B: Fläche des Meßbereichs (parallel zur "GAE" angenommen), auf die die Gestaltsabweichungen des Reliefs bzw. die Kluftflächen der Hauptkluftschar bezogen werden.

d) Grund- und Hüllebene: Gedachte, parallel zur "GAE" soweit verschobene Grenzebenen, daß sie die tiefsten und höchsten Stellen des Reliefs tangieren.

e) Rauhtiefe R: Senkrechter Abstand zwischen Grund- und Hüllebene. Sie wird als maßgebend für das Zusammenspiel sonstiger vorgegebener Trennflächenscharen angesehen.

f) Wandscheibe: Allseitige Begrenzungen des geometrisch als vollkommen gedachten Reliefs. Sie wird durch die Bezugsfläche F_B und die Rauhtiefe R eindeutig bestimmt.

g) Kluftflächensumme $\sum_{i=1}^{n} K_i$: Summe der sich nicht überschneidenden Projektionen aller im Relief gelegenen Kluftflächen der Hauptkluftschar auf die Bezugsfläche F_B.

Der "effektive Kluftflächenanteil" $\varkappa_{eff.}$ der Hauptkluftschar wird für die bestimmte Rauhtiefe R des Reliefs durch das Verhältnis der Kluftflächensumme $\sum_{i=1}^{n} K_i$ der Hauptkluftschar zur Bezugsfläche F_B berechnet.

$$\varkappa_{eff.} = \frac{\sum_{i=1}^{n} K_i}{F_B} \qquad (26)$$

Als Maß für die Abhängigkeit des soeben ermittelten effektiven Kluftflächenanteils vom Zusammenspiel sonstiger vorgegebener Trennflächenscharen wird der auf die Raumeinheit der Wandscheibe bezogene Flächeninhalt der Hauptkluftschar betrachtet.

$$\varkappa_r = \frac{\sum_{i=1}^{n} K_i}{F_B \cdot R} \quad [m^{-1}] \qquad (27)$$

Aus Gl. (26) und (27) kann diese Abhängigkeit durch die Tangensfunktion

$$\tan \delta_i = \frac{\varkappa_{eff.}}{R} \qquad (28)$$

beschrieben werden, wobei δ_i = arc tan $\varkappa_r$ und $0^\circ < \delta_i < 90^\circ$ ist (s. Abb. 45, S. 87).

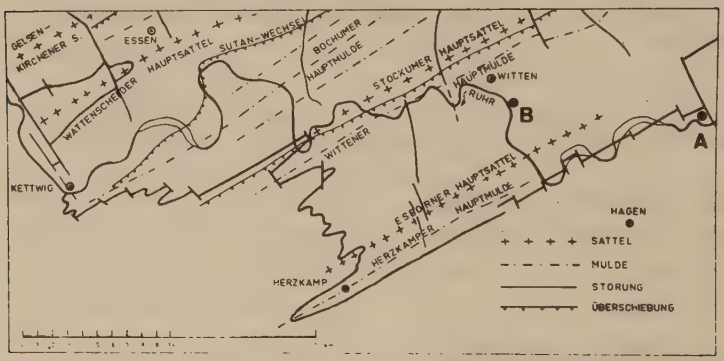
6.4 Erfassung im Gelände

6.4.1 Ausgewählte Beispiele

Die beiden nachstehend gegebenen, exemplarisch durchgeführten Geländeaufnahmen sollen zur Illustration der bereits dargestellten Konzeption zur Erfassung des effektiven Durchtrennungsgrades im Gelände dienen.

Bei den hier untersuchten Aufschlüssen handelt es sich um die Steinbrüche Brüninghaus - Schiermeyer am Bahnhof Westhofen (Beispiel A) wie auch um die Steinbrüche H. Rauen in Witten-Gedern (Beispiel B)(s.Abb. 13, S.31 und Tab. 2, S. 32). Die Steinbruchwände beider Aufschlüsse sind im wesentlichen durch Sprengen entstanden. Stratigraphisch befinden sich beide Aufschlüsse im

Grundgebirge des flözführenden Oberkarbons. Petrographisch besteht das Grundgebirge insgesamt aus einer Wechsellagerung von teils konglomeratischen Sandsteinen, Schiefertonen und Steinkohlenflözen. Die Tektonik des Grundgebirges ist mannigfaltig: Mehrere Groß- und Spezialfalten, Auf- und Überschiebungen wie auch Querstörungen durchziehen es mit meist WSW-ENE Generalstreichen (Abb. 31).



A: Steinbruch Brüninghaus – Schiermeyer in Westhofen
B: Steinbruch H.Rauen in Witten – Gedern

Abb.: 31 Ausschnitt aus der tektonischen Übersichtskarte des Oberkarbon im Bereich der exemplarisch untersuchten Aufschlüsse (aus RICHTER, 1971)

Struktur- und gefügekundliche Untersuchungen im Ruhrrevier haben deutliche Symmetriebeziehungen von Klüftung und Faltung nachgewiesen. Dennoch wird im geologischen Schrifttum die Existenz von Klüften vorwiegend vor der eigentlichen Faltung angenommen (s. bei ADLER et al., 1964).

Um den direkten Einfluß von Faltenstrukturen und Bruchstörungen möglichst gering zu halten, ist bei der Auswahl der nachstehenden, exemplarisch untersuchten Aufschlüsse nach der ersten Aufschlußbedingung (Kap. 6.2) wie folgt vorgegangen worden: Einmal konzentrierte sich die Kluftanalyse im Hinblick auf die Definition von Homogenbereichen in Faltenflügeln und im Liegenden bzw. im Hangenden von Störungen. Zum anderen wurde diese auf möglichst kleine Aufschlußbereiche in der Größenordnung von 20 bis 40 m Aufschlußlänge und von etwa 10 bis 20 m Aufschlußhöhe beschränkt. Erfahrungsgemäß können nämlich die Beziehungen zwischen Kluftscharen in relativ kleinen Aufschlußbereichen am klarsten festgestellt werden. Bei der Aufnahme der Kluftstellungen wurden hierbei alle beobachtbaren Klüfte sowohl in den kompetenten als auch in den inkompetenten Schichten eingemessen.

Voraussetzung für die Abschätzung des "effektiven Durchtrennungsgrades" in solchen Aufschlußbereichen ist, nach der zweiten Aufschlußbedingung, daß diese in der Richtung der meist gut ausgebildeten Kluftschar angelegt sind. Im Vorgriff auf die im Kap. 6.4.4 dargestellten Ergebnisse wird deshalb schon hier mitgeteilt, daß die in den untersuchten Aufschlüssen vorkommenden Klüfte sich in zwei etwa orthogonal zueinander und normal zu der Schichtung stehenden Trennkluftscharen zuordnen ließen, von denen die eine ("Hauptkluftschar") besser ausgebildet war als die andere ("Nebenkluftschar"). In beiden Aufschlüssen sind Meßbereiche aufgenommen, welche ausschließlich in der Richtung der jeweils vorliegenden Hauptkluftschar angelegt worden waren.

6.4.1.1 Beispiel A: Steinbrüche Brüninghaus - Schiermeyer am Bahnhof Westhofen

TK 25 4511 Hörde

$r^{33}97000\ h^{57}\ 99175$

Schichten: untere Sprockhöveler Schichten

Petrographische Einordnung: Wechsellagerung von grobgebankten Sandsteinen, reinen bis sandigen Schiefertonen und feinkörnigen, tonhaltigen Sandsteinen

Tektonische Position: Auf dem Südflügel der flachen Westhofener Spezialmulde (östliche Fortsetzung der südlichen Herzkamper Hauptmulde) (Abb. 31 und Abb. 33).

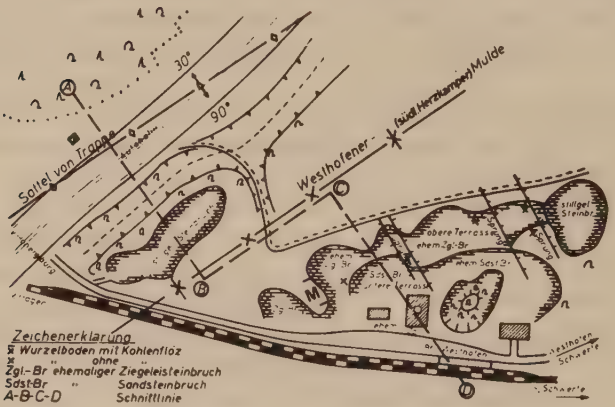


Abb.: 32 Grundrißliche Skizze der Steinbrüche „Brüninghaus-Schiermeyer" in Westhofen nach HAHNE (1958)
M = Aufgenommener Meßbereich

Der Steinbruch ist in zwei Abbauterrassen angelegt (Abb. 32). Die untere Abbauterrasse besteht aus einem 12 bis 15 m mächtigen mittel- bis grobkörnigen, grobgebankten Sandsteinpaket. Auf diesen Sandstein folgen 2 bis 3 m mächtige sandige Schiefertone und feinkörnige Sandsteine in Wechsellagerung.

Abb.: 33 Profil A-B-C-D bis zur Luisenglücker Mulde (aus HAHNE, 1958)
M = Aufgenommener Meßbereich

Dieses dünne Schichtpaket zusammen mit der darauf folgenden ca. 20 m mächtigen Schichtenfolge aus sandigen bis schwachsandigen Schiefertonen bilden die obere Abbauterrasse. Die Schichten fallen flach bis zu 20° nach NW zum Muldeninnern. Zwei Systeme von querschlägigen Abschiebungen haben im mittleren und östlichen Teil des Steinbruchs vermutlich zur Bildung von kleinen Horst- und Grabenstrukturen geführt. Das Kluftsystem besteht aus zwei gut ausgebildeten, in etwa normal zueinander sowie normal zu den Schichten stehenden Kluftscharen, von denen die eine (Hauptkluftschar) straffer geregelt ist als die andere (Nebenkluftschar)(Abb. 43, S. 83). Die Kluftoberflächen beider Kluftscharen sind überwiegend in den sandigen Gesteinslagen durch Absatz von Eisenoxyd intensiv rot gefärbt.

In diesem Aufschluß wurde die Abschätzung des "effektiven Durchtrennungsgrades" der Hauptkluftschar in einem von den Querstörungen nicht beeinflußten Meßbereich in der westlichen Seite des oberen Steinbruches vorgenommen (Abb. 33 und 36). Die Felsoberfläche ist in diesem Meßbereich nahezu vertikal und in der

Richtung der im Aufschluß vorliegenden Hauptkluftschar angelegt. Seitlich ist dieser Meßbereich von einer vertikalen, durch den Abbau bedingten, durchgehenden Abstufung (links) und von einer nahezu normal zum Meßbereich stehenden Steinbruchwand (rechts), die überwiegend aus Klüften der Nebenkluftschar entstanden sind, begrenzt. Die unteren und oberen Grenzen des Meßbereiches werden von der Bruchsohle und von einem ca. 0,5 m mächtigen Überlagerungsschutt aus Lößlehm bestimmt (Abb. 36, S. 75).

6.4.1.2 Beispiel B: Steinbruch H. Rauen bei Witten-Gedern

TK 25 4510 Witten
$r^{25}94400\ h^{57}99450$

Schichten:	Sprockhöveler Schichten, Namur C
Petrographische Einordnung:	Wechsellagerung von z. T. konglomeratischen Sandsteinen, reinen bis sandigen Schiefertonen und Steinkohlen-Flözen
Tektonische Position:	Wittener Hauptmulde auf dem Nordflügel des Kirchhörder Spezialsattels (Abb. 31, S. 68 und Abb. 35, S. 73).

Dieser Abschluß setzt sich aus zwei Brüchen zusammen, die etwa 30 m übereinander liegen (Abb. 34, S. 73). Die Felswände in beiden Brüchen sind steil und überwiegend in der Richtung einer in den kompetenten Gesteinslagen meist gut ausgebildeten Hauptkluftschar angelegt. Diese Hauptkluftschar zusammen mit einer weniger gut ausgebildeten Nebenkluftschar bilden das Kluftsystem in diesem Aufschluß (Abb. 43, S. 83). Vor den beiden Felswänden und parallel zu diesen streicht mit ca. 20° durch den ganzen Steinbruch eine nach SW einfallende Querstörung, die die mit 45° - 50° nach NW einfallenden Schichten um etwa 60 m versetzt hat.

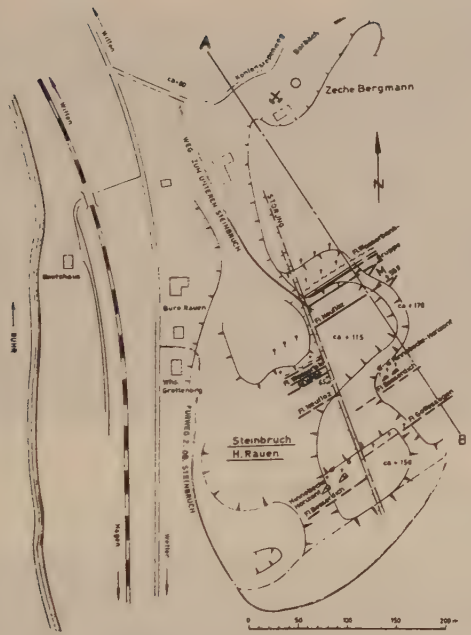


Abb. 34 Grundskizze der Steinbrüche H. Rauen bei Witten - Gedern nach HAHNE, 1958
M = Aufgenommener Meßbereich

Abb. 35 Schematischer Querschnitt AB im Bereich der Steinbrüche H. Rauen nach HAHNE, 1958
M = Aufgenommener Meßbereich

Die Geländeaufnahmen zur Abschätzung des "effektiven Durchtrennungsgrades" der Hauptkluftschar sind im oberen Bruch, welcher im Gegensatz zum unteren stillgelegt ist, durchgeführt worden. Für diesen Zweck ist ein von der Querstörung nicht beeinflußter Meßbereich in der Steinbruchswand entsprechend den in Kap. 6.2 aufgestellten Aufschlußbedingungen festgelegt (Abb. 35 und Abb. 37). Dieser Meßbereich besteht aus einer konglomeratischen Sandsteinpartie mit dünnen Tonsteineinlagerungen und ist seitlich von einer Tonschicht im Hangenden wie auch von einer vorgestreckten Schichtplatte im Liegenden des Flözes "Neuflöz" begrenzt. Die unteren und oberen Grenzen des Meßbereiches sind durch die Bruchsohle und die Begrenzung markanter Kluftflächen entsprechend festgelegt.

6.4.2 Verfahren zur Geländeaufnahme

Für eine sinnvolle geometrische Erfassung des Reliefs von hohen, der direkten Messung unzugänglichen Aufschlußoberflächen, erweisen sich die nur auf die Verwendung von Kompaß und Meßband beruhenden, üblichen geologischen Aufnahmeverfahren als unzureichend. Hierzu wurde in vorliegender Arbeit ein neues Verfahren entwickelt, welches auf dem aus der Vermessungskunde bekannten Prinzip der Tachymetrie beruht (ARTOPOULOS, 1974). Dieses Verfahren besteht in der Aufnahme von markanten Punkten des Reliefs, die gleichzeitig den Grenzverlauf des betrachteten Meßbereichs sowie den Umfang aller in diesem Bereich aufgeschlossenen Kluftflächen der untersuchten Kluftschar kennzeichnen, mit Hilfe des Reduktionstachymeters. Bei der Festlegung und Aufnahme der Meßpunkte in den untersuchten Aufschlußbereichen wurde nach folgenden Gesichtspunkten verfahren:

a) Festlegung der Meßpunkte (s. Abb. 36 und 37): Für jede Kluftfläche, die an der Aufschlußoberfläche vollständig erhalten war und eine vollelliptische Konfiguration (Kap. 4.4) erkennen ließ, wurden je nach ihrer Flächengröße 10 bis 20, jedoch mindestens 5 Meßpunkte an ihrem Rand festgelegt. Für

SSW NNE

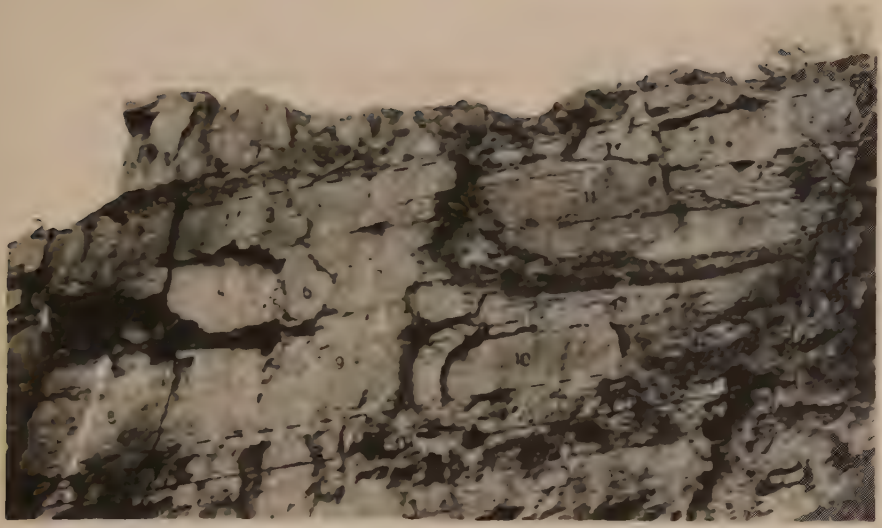


Abb 36 Aufgenommener Meßbereich im Steinbruch Bruninghaus-Schiermeyer am Bahnhof Westhofen (Beispiel A)

NW SE

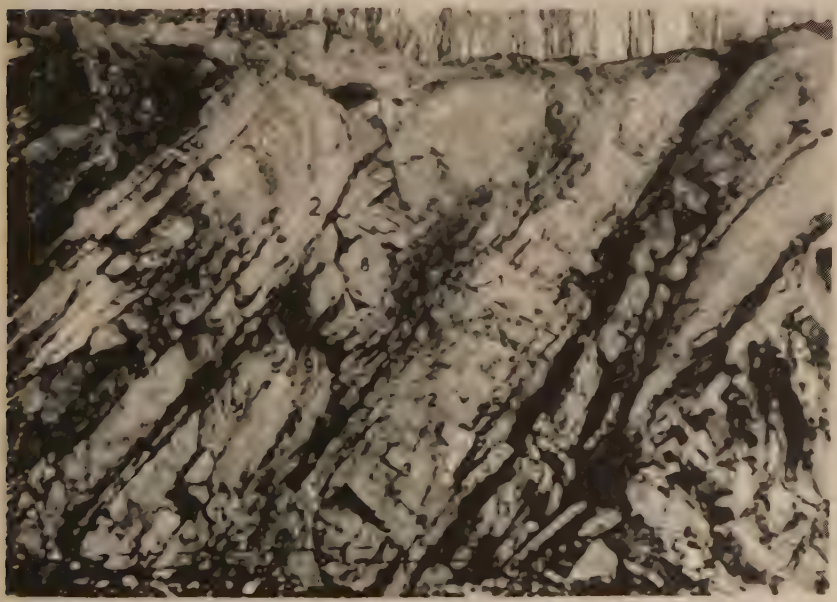


Abb 37 Aufgenommener Meßbereich im Steinbruch H Rauen in Witten-Gedern (Beispiel B)

jede Kluftfläche, die nicht vollständig erhalten war und überwiegend gradlinige Begrenzungen aufwies, wurden ihre sämtlichen Eckpunkte als Meßpunkte festgelegt. Hinzu wurden noch alle Eckpunkte, die den Grenzverlauf des untersuchten Meßbereichs (Bezugsfläche) nachzeichnen, festgelegt. In Abb. 36 und Abb. 37 ist von der Gesamtzahl der jeweils aufgenommenen Meßpunkte der Übersichtlichkeit halber nur ein Teil eingetragen worden.

b) Prinzip der Geländeaufnahmen: Es werden zwei Standpunkte A_i, B_i im Gelände für das Tachymeter festgelegt, so daß die Richtung der "Standlinie" A_iB_i mit der Nordrichtung (Bezugsrichtung) übereinstimmt (Abb. 38) (Bei diesem Verfahren kann jedoch außer der Nordrichtung auch jede andere Richtung als Bezugsrichtung angenommen werden). Die Länge dieser Standlinie und ihre Entfernung von der Aufschlußoberfläche werden so ausgewählt, daß die Vermessung der vorgemerkten Meßpunkte durch das Tachymeter von beiden Standpunkten aus möglichst genau durchgeführt werden kann. Erfahrungsgemäß sollen die

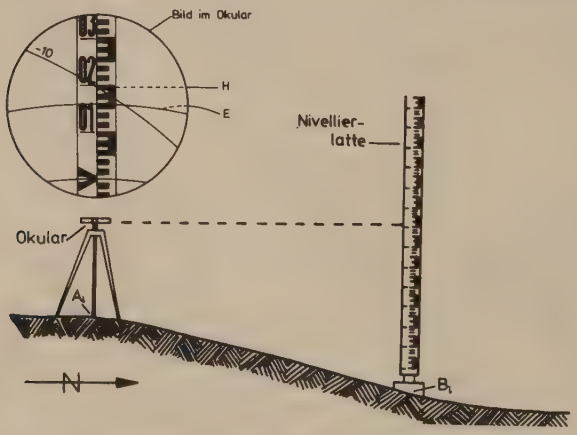


Abb. 38 Bestimmung der Entfernung und des Höhenunterschiedes zwischen den Standpunkten A_i und B_i durch das Tachymeter und einer Nivellierlatte
Höhenunterschied: H = -1,93 m
Entfernung: E = 15,90 m

Länge der Standlinie die 12 - 15 m und ihre durchschnittliche Entfernung von der Aufschlußoberfläche die 25 - 35 m nicht überschreiten. Vom Standpunkt A_i aus und für jeden Meßpunkt M_i des Reliefs werden ein horizontaler Winkel α_i' und ein vertikaler Winkel ε_i' gemessen (Abb. 39). Vom Standpunkt B_i aus wird für jeden Meßpunkt M_i nur ein horizontaler Winkel β_i' gemessen. Zusätzlich zu den aufgenommenen Meßpunkten an der Aufschlußoberfläche werden noch die Länge l der Standlinie und der Höhenunterschied Δh zwischen den beiden Standpunkten A_i und B_i durch das Tachymeter mit Hilfe einer Nivellierlatte erhoben (Abb. 38).

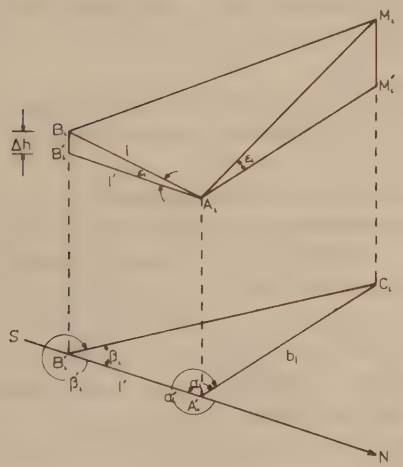


Abb. 39 Prinzip der Winkelaufnahme eines Meßpunktes M_i des Reliefs von den Standpunkten A_i, B_i einer steigenden Standlinie

6.4.3 Verfahren zur Auswertung der Geländeaufnahmen

Die Auswertung der Geländedaten hinsichtlich der Kluftstellungen bei der Festlegung der untersuchten Aufschlüsse erfolgte durch die Anwendung einer für die Rechenanlage TR/440 der Ruhr-Universität in FORTRAN IV umgeschriebenen Version des Rechenprogrammes "GELI" (KIRSCHKE, 1970) und ging in folgenden Schritten vor sich:

a) Darstellung der Raumstellung der Klüfte durch die Durchstoßpunkte der Kluftflächenpole in der unteren Lagenkugelprojektion (Abb. 43 Aa und Ba)

b) Auszählung der prozentualen Besetzungsdichte der Polpunkte und Zeichnung von Dichtelinien bzw. Isolinien (Abb. 43 Ab und Bb)

c) Rechnerische Bestimmung statistisch typischer Kennziffern für die auftretenden Polpunktmaxima.

Die Auswertung der Geländeaufnahmen in Hinblick auf die Abschätzung des "effektiven Durchtrennungsgrades" erfolgte ebenfalls anhand eines in FORTRAN IV für diesen Zweck geschriebenen Programmes für die Rechenanlage der Ruhr-Universität. Dieses Programm kann in einer vereinfachten Form auch im Gelände benutzt werden, wenn ein programmierbarer Taschenrechner zur Verfügung steht. Im ANHANG A ist neben dem vollständigen Programm für die Rechenanlage noch eine wesentlich vereinfachte Version für den Taschenrechner "Hewlett-Packard-HP-65" angegeben.

Nachstehendes, in Abb. 40 skizziertes Auswertungsschema, soll an dieser Stelle die dieser Auswertung zugrundeliegende Methodik verdeutlichen:

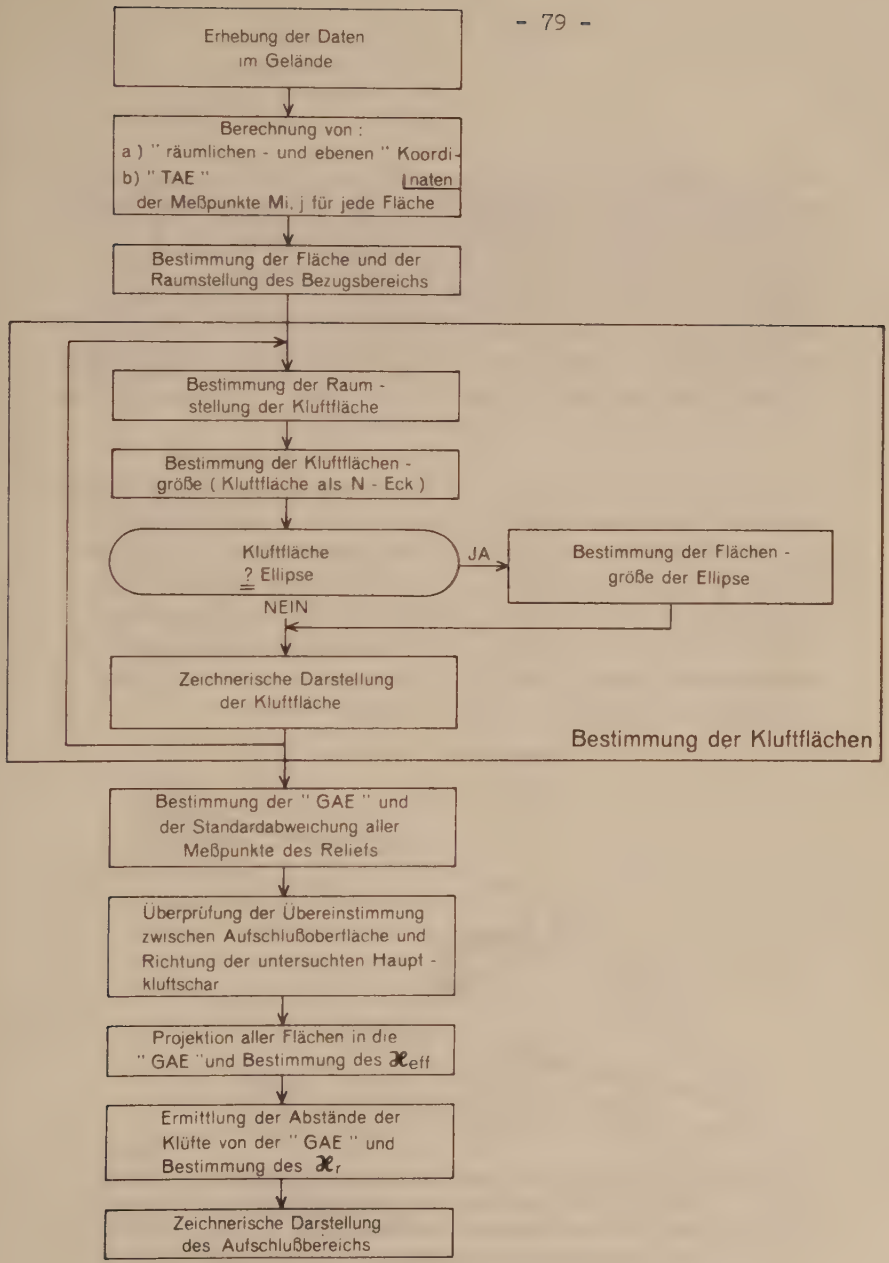


Abb.40 Auswertungsschema der Geländeaufnahmen im Hinblick auf die Abschätzung des effektiven Durchtrennungsgrades
(Erläuterung der Symbole und Abkürzungen s. Text)

Voraussetzung für die Berechnung der räumlichen Koordinaten der Meßpunkte ist die Festlegung eines Bezugssystems. Hierzu wird ein dreidimensionales Koordinatensystem (R, S, T) so angelegt, daß der Nullpunkt mit dem Standpunkt A_i im Gelände übereinstimmt (Abb. 41). Danach wird die Standlinie A_iB_i bzw. die NS-Richtung als die R-Achse, senkrecht zu dieser und auf die horizontale Ebene die S-Achse und normal zu den beiden ersten die T-Achse definiert. Die Richtung von A_i zu B_i wird stets als positiv angenommen.

Wichtig für die Ermittlung der Raumstellung und der Flächengröße der einzelnen Kluftflächen sowie der Bezugsfläche F_B aus den räumlichen Koordinaten ihrer Meßpunkte ist die Betrachtung einer Bezugsebene. Als solche wird jeweils die mittlere bzw. ausgleichende Ebene durch die Meßpunkte $M_{i,j}$ jeder Fläche festgelegt (s. ANHANG A). Diese ausgleichenden Ebenen werden entsprechend der "GAE" des Reliefs Teil-Ausgleichsebenen.auch kurz "TAE" genannt.

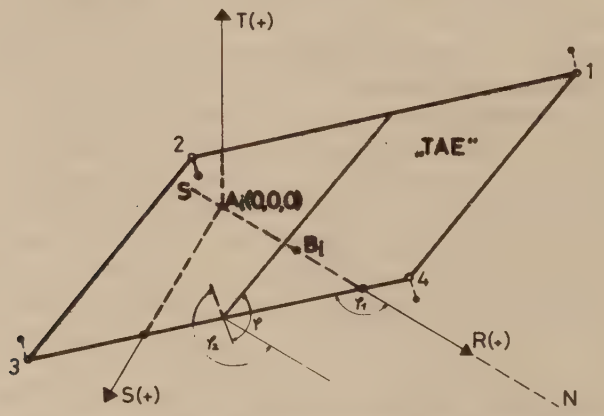


Abb.41 Darstellung des dreidimensionalen Koordinatensystems (R,S,T) und Definition von Raumstellung und Flächengröße einer viereckigen Kluftfläche

- • ursprüngliche Meßpunkte
- o projizierte Meßpunkte in der „TAE"

φ = Einfallen
φ_1 = Streichen
φ_2 = Richtung des Einfallens

Die Raumstellung für jede einzelne Fläche wird durch die Raumstellung ihrer "TAE" und die Flächengröße durch den von den projizierten Meßpunkten ihres Umfanges in die "TAE" bestimmten Flächeninhalt angegeben (Abb. 41). Die mittlere bzw. ausgleichende Ebene des Reliefs ("GAE") wird durch sämtliche Meßpunkte der Aufschlußoberfläche errechnet (Abb. 42).

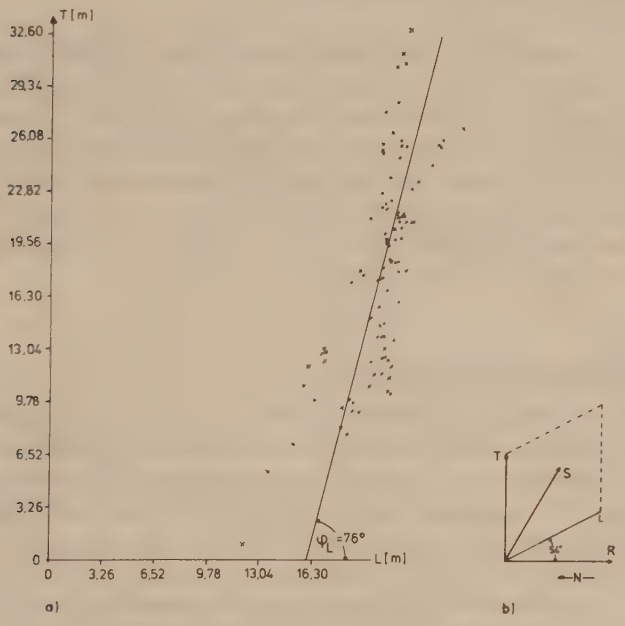


Abb.42 a) Profil-Darstellung der "GAE" sämtlicher Meßpunkte des Reliefs
b) Orientierung der Schnittebene durch das Profil
(untersuchter Meßbereich im Beispiel B, Profilseite 1-2 Abb 37)

Demnach werden alle Kluftflächen sowie die Bezugsfläche F_B in die "GAE" projiziert und der Flächenanteil $\varkappa_{eff.}$ der

Kluftflächen nach Gl. (26) bestimmt. Ferner werden die Abstände aller Kluftflächen (Mittelpunkte) von der "GAE" berechnet und der Abstand zwischen der tiefsten und der höchsten Kluftfläche als die "Rauhtiefe" R des Reliefs angenommen. Aus dem effektiven Kluftflächenanteil $\varkappa_{eff.}$, der Rauhtiefe R und der Bezugsfläche F_B wird nach Gl.(27) der auf die Raumeinheit in der Wandscheibe bezogene Flächeninhalt der Kluftschar $\varkappa_r$ ermittelt.

Die in der zweiten Aufschlußbedingung (Kap. 6.2) vorausgesetzte Übereinstimmung zwischen der Aufschlußoberfläche und der Richtung der untersuchten Hauptkluftschar wird einmal durch den Vergleich der Raumstellungen der Hauptkluftschar und der an der Aufschlußoberfläche eingemessenen Kluftflächen, zum anderen durch den Vergleich der Raumstellung der letzteren und der "GAE" des Reliefs durch die Rechenanlage überprüft (Abb. 43 und Abb.44, Kap.6.4.4).

6.4.4 Grundsätzliche Ergebnisse

Die vollständige Auswertung mit den in den einzelnen Schritten errechneten numerischen Werten für beide aufgeführte Geländebeispiele ist in ANHANG B zusammengestellt. Nachstehend sollen nur die grundsätzlichen Ergebnisse dargestellt und diskutiert werden.

Abb. 43 illustriert die Ergebnisse der Auswertung hinsichtlich der Kluftstellungen in beiden Aufschlüssen. Danach ist die Klassifizierung der in diesen vorkommenden Klüften jeweils in einer straff geregelten Hauptkluftschar und in einer stärker streuenden Nebenkluftschar nach Augenschein und ohne Zuhilfenahme statistischer Verfahren möglich.

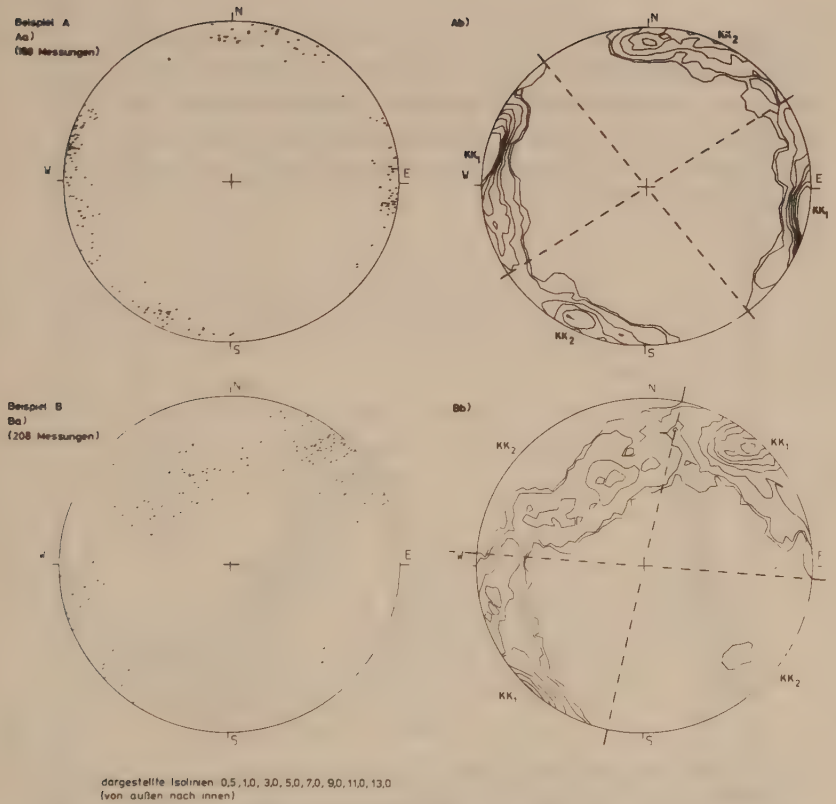


Abb. 43 Auswertung der Kluftstellungen: Aa und Ba) Kluftflächenpole in der unteren Lagenkugelprojektion; Ab und Bb) Isoliniendarstellung und Abgrenzung der beiden Kluftscharen nach Augenschein

Als Bestätigung dafür, daß die in diesen Aufschlüssen aufgenommenen Meßbereiche in der Richtung der jeweils vorkommenden Hauptkluftschar angelegt worden sind, kann einmal die Übereinstimmung zwischen den Kluftflächenpolen der Haupt-

kluftscharen in Abb. 43 und den Kluftflächenpolen der gemessenen Kluftflächen in den untersuchten Meßbereichen (Abb. 44), zum anderen die Übereinstimmung zwischen den Großkreisen der letzteren und den Großkreisen der "GAE" der Reliefs in der flächentreuen Lagenkugelprojektion gesehen werden (Abb. 44).

Abb.44 Darstellung der Polpunkte und Großkreise der aufgenommenen Hauptkluftflächen und der "GAE" der Reliefs beider Meßbereiche in der unteren Lagenkugelprojektion

In Tab. 5 und Tab. 6 sind die Ergebnisse hinsichtlich des "effektiven Durchtrennungsgrades" der untersuchten Hauptkluftscharen in beide Geländebeispiele zusammengefaßt:

WESTHOFEN, 1. WAND, AUFGENOMMEN AM 29.8.74 GERECHNET AM 9. 4.76

********** BERECHNUNG DER PROJEZIERTEN FLAECHEN IN DER GESAMTAUSGLEICHSEBENE **********

MESSPAKET	EINFALLEN	STREICHEN	RICHTUNG DES EINFALLENS	FLAECHE ALS ELLIPSE (KORRIGIERT)	FLAECHE ALS N-ECK	A-ACHSE (GANZ)	B-ACHSE (GANZ)
1	87.82 GRAD	12.84 GRAD	102.84 GRAD	"	63.83 QM	"	"
2	89.12 GRAD	9.31 GRAD	99.31 GRAD	4,28 QM	3.23 QM	3.16 M	1.89 M
3	88.28 GRAD	11.71 GRAD	281.71 GRAD	"	3.04 QM	"	"
4	88.45 GRAD	2.40 GRAD	272.40 GRAD	2,26 QM	1.86 QM	2.04 M	1.41 M
5	88.37 GRAD	7.34 GRAD	277.34 GRAD	"	0.25 QM	"	"
6	89.88 GRAD	6.33 GRAD	276.33 GRAD	1,90 QM	0.83 QM	1.86 M	1.30 M
7	87.11 GRAD	8.85 GRAD	278.85 GRAD	"	2.04 QM	"	"
8	89.24 GRAD	11.72 GRAD	101.72 GRAD	8,65 QM	7.43 QM	7.29 M	2.18 M
9	88.75 GRAD	20.33 GRAD	110.33 GRAD	"	4.38 QM	"	"
10	85.31 GRAD	17.50 GRAD	287.50 GRAD	2,57 QM	2.02 QM	2.77 M	1.30 M
11	83.98 GRAD	8.64 GRAD	278.64 GRAD	13,87 QM	10.26 QM	11.72 M	2.72 M
12	81.56 GRAD	14.61 GRAD	104.61 GRAD	"	3.66 QM	"	"

SUMME DER EINZELFLAECHEN	45,46 QM
BEZUGSFLAECHE	63,83 QM
DICKE DER WANDSCHEIBE (RAUHTIEFE)	0,58 M
EFFEKTIVER KLUFTFLAECHENANTEIL	0,71
RAEUMLICHER KLUFTFLAECHENANTEIL IN DER WANDSCHEIBE	1,23 /M

Tab.5 Zusammenstellung der berechneten Reliefdaten der Aufschlußoberfläche in Beispiel A (Ausgabe der Rechenanlage)

WITTEN GERECHNET AM 9. 4.76

•••••••••••••••••••••••••••••••• BERECHNUNG DER PROJEZIERTEN FLAECHEN IN DER GESAMTAUSGLEICHSEBENE ••••••••••••••••••••••••••••••••

MESSPAKET	EINFALLEN	STREICHEN	RICHTUNG DES EINFALLENS	FLAECHE ALS ELLIPSE (KORRIGIERT)	FLAECHE ALS N-ECK	A-ACHSE (GANZ)	B-ACHSE (GANZ)
1	69.97 GRAD	141.25 GRAD	231.25 GRAD	-	308.12 QM	-	-
2	76.36 GRAD	193.30 GRAD	283.30 GRAD	-	47.80 QM	-	-
3	68.49 GRAD	141.55 GRAD	231.55 GRAD	-	20.89 QM	-	-
4	79.59 GRAD	140.43 GRAD	230.43 GRAD	13.86 QM	11.68 QM	5.06 M	4.93 M
5	85.02 GRAD	156.59 GRAD	66.59 GRAD	-	2.33 QM	-	-
6	74.92 GRAD	147.04 GRAD	237.04 GRAD	-	9.77 QM	-	-
7	71.43 GRAD	122.43 GRAD	212.43 GRAD	-	10.73 QM	-	-
8	67.17 GRAD	125.27 GRAD	215.27 GRAD	20.94 QM	16.64 QM	9.14 M	3.65 M
9	74.35 GRAD	124.32 GRAD	214.32 GRAD	18.19 QM	12.04 QM	5.78 M	4.01 M
10	74.01 GRAD	134.32 GRAD	224.32 GRAD	-	14.32 QM	-	-
11	83.92 GRAD	130.35 GRAD	220.35 GRAD	-	3.63 QM	-	-
12	78.46 GRAD	145.49 GRAD	235.49 GRAD	-	11.73 QM	-	-
13	75.67 GRAD	145.90 GRAD	255.90 GRAD	14.37 QM	8.41 QM	10.64 M	3.21 M
14	82.27 GRAD	136.46 GRAD	226.46 GRAD	12.85 QM	15.30 QM	9.79 M	2.58 M
15	78.70 GRAD	129.73 GRAD	219.73 GRAD	-	39.98 QM	-	-
16	69.19 GRAD	148.84 GRAD	238.84 GRAD	-	9.25 QM	-	-

SUMME DER EINZELFLAECHEN	214.31 QM
BEZUGSFLAECHE	308.12 QM
DICKE DER WANDSCHEIBE (RAUHTIEFE)	4.63 M
EFFEKTIVER KLUFTFLAECHENANTEIL	0.70
RAEUMLICHER KLUFTFLAECHENANTEIL IN DER WANDSCHEIBE	0.15 /M

Tab.6 Zusammenstellung der berechneten Reliefdaten der Aufschlußoberfläche in Beispiel B (Ausgabe der Rechenanlage)

Während beide Hauptkluftscharen einen nahezu gleich großen effektiven Kluftflächenanteil aufweisen (Beispiel A: $\varkappa_{eff.}$ = 0,71; Beispiel B: $\varkappa_{eff.}$ = 0,70), unterscheiden sich ihre auf die Raumeinheit in den Wandscheiben bezogenen Flächeninhalte stark voneinander (Beispiel A: $\varkappa_r$ = 1,23 [m^{-1}] ; Beispiel B: $\varkappa_r$ = 0,15 [m^{-1}]). Danach ist dem effektiven Kluftflächenanteil der in Beispiel B untersuchten Hauptkluftschar eine größere Abhängigkeit vom Zusammenspiel sonstiger vorgegebener Trennflächenscharen beizumessen als dem in Beispiel A untersuchten (s. auch Abb. 45).

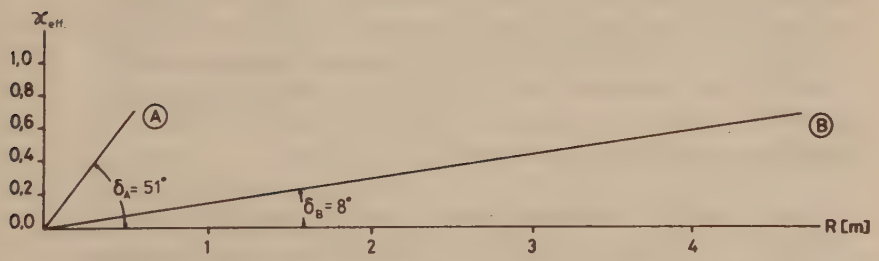


Abb. 45 Graphische Darstellung der Abhängigkeit des $\varkappa_{eff.}$ der untersuchten Hauptkluftscharen vom Zusammenwirken sonstiger vorgegebener Trennflächenscharen in den aufgeführten Geländebeispielen

7. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Gewonnene Erkenntnisse

Die Tatsache, daß die Bestimmung des geomechanisch und geotechnisch wichtigen Parameters "Durchtrennungsgrad" im Gelände mit großen Schwierigkeiten verbunden ist, war zwar in der Literatur nicht unbekannt, wurde jedoch bisher niemals soweit erforscht und berücksichtigt, wie es für eine praxisorientierte und geländegerechte Erfassung des Durchtrennungsgrades erforderlich gewesen wäre.

Wie die Untersuchung der für den Durchtrennungsgrad maßgeblichen geologischen Faktoren und die Diskussion der bestehenden Konzeptionen zeigen, bestehen diese Schwierigkeiten darin, einmal die geometrischen und mechanischen Aspekte bei der Formulierung des Durchtrennungsgrades miteinander zu verknüpfen, zum anderen die Eingangsdaten im Gelände mit einer der Empfindlichkeit dieses Parameters angemessenen Genauigkeit zu erheben.

Es wurde gezeigt, daß eine Verknüpfung der geometrischen und mechanischen Aspekte des Durchtrennungsgrades die Kenntnis des Bruchvorganges in der Felsmasse voraussetzt.

Wegen seiner Abhängigkeit vom Bruchvorgang sollte der Durchtrennungsgrad eines Gesteinskörpers nicht als ein konstanter, sondern als ein variabler Parameter betrachtet werden, dessen Größe stets vom Zusammenspiel aller vorgegebenen Trennflächenscharen und dem künftigen Beanspruchungsplan bestimmt wird. Als Folge davon ist eine exakte Ermittlung des Durchtrennungsgrades im Zuge der ingenieurgeologischen Erkundung im Gelände im Prinzip nicht möglich. Dieser kann bestenfalls nur in geologisch und geomechanisch eindeutig definierten Sonderfällen, und dann auch nur in seiner Größenordnung, abgeschätzt werden.

Die Kenntnis der Bedeutung von geologischen Einflußfaktoren (Art und Ausbildung des Trennflächengefüges, Gesteinsaufbau) für den Durchtrennungsgrad konnte vertieft werden. Es werden Wege gezeigt, wie mit Hilfe von relativ einfachen Ingenieurverfahren in geologisch eingegrenzten Sonderfällen ein oberer und ein unterer Grenzwert für den Durchtrennungsgrad erfaßt werden können. Danach wird in geschichteten Sedimentgesteinen von einem geometrisch und mechanisch bedingten oberen Grenzwert von $\mathcal{X} = 1{,}0$ für den Durchtrennungsgrad ausgegangen. Die Annahme eines solchen oberen Grenzwertes auch in massigen Sedimentgesteinen erscheint jedoch angesichts der Geometrie ihrer Trennflächengefüge ("Mehrkörper-System", s. Kap. 5.1) als nicht realistisch. Ein unterer Grenzwert wird in geschichteten sowie in massigen Sedimentgesteinen durch die Abschätzung des "effektiven Durchtrennungsgrades" von einzelnen, potentiell gefährlichen Kluftscharen über die "Makrorauhigkeit" des Reliefs bestimmter Aufschlußoberflächen erfaßt.

Das Konzept der "Makrorauhigkeit" ermöglicht, die geometrischen und mechanischen Aspekte des Durchtrennungsgrades in einer für die Felsbaupraxis zuverlässigen Weise miteinander zu verknüpfen. Die durch dieses Konzept errechneten Werte für den "effektiven Durchtrennungsgrad" hängen jedoch weitgehend mit dem Beanspruchungsplan, der zur Entstehung der untersuchten Aufschlußoberfläche geführt hat, zusammen und sollen daher nur als Anhaltswerte für die Gesteinsdurchtrennung gesehen werden.

Praktische Konsequenzen

Die Erkenntnis, daß der Durchtrennungsgrad im Gelände nicht als ein vollständig erfaßbarer, exakt zu ermittelnder Parameter betrachtet werden kann, ist für die Felsbaumechanik besonders schwerwiegend. Ihrer Forderung, den Durchtrennungsgrad mit einer Genauigkeit bis zu 10 % zu bestimmen (s. z.B.

Entwurf für Richtlinien, Second draft of ISRM Working Party, 1975) kann angesichts der Schwierigkeiten dieses Begriffes kaum entsprochen werden. Als Folge davon sollte die Praxis von der ausschließlichen Verwendung des Durchtrennungsgrades für Festigkeits- und Sicherheitsüberlegungen verzichten oder aber sich mit einer Abschätzung seiner Größenordnung für bestimmte, geologisch und geomechanisch definierte Sonderfälle begnügen. Im letzteren Fall sollte die durch die Verwendung von Näherungswerten für den "Durchtrennungsgrad" auftretende Einbuße an Aussagegenauigkeit bei der Berechnung und der Durchführung von Felsbauwerken berücksichtigt werden.

Ausblick

Die vorliegende Arbeit ist ein erster Schritt auf dem Wege zur quantitativen Klärung der Zusammenhänge zwischen Oberflächengeometrie bzw. "Makrorauhigkeit" des Reliefs von natürlichen und künstlichen Aufschlußoberflächen und deren "effektivem Durchtrennungsgrad". Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen erscheint für die Zukunft die Verwendung der "Makrorauhigkeit" als Grundlage für eine auf mechanischen Gesichtspunkten ausgerichteten geometrischen Abschätzung der Gesteinsdurchtrennung im Gelände vielversprechender zu sein als der Versuch nach einer Verbesserung des konventionellen Durchtrennungsgrad-Konzeptes.

LITERATURVERZEICHNIS

ADLER, R. E., KIRCHMAYER, M. und PILGER, A.: Klüfte und Schlechten im flözführenden Gebirge des Ruhrgebietes. Die geschichtliche Entwicklung der kleintektonischen Untersuchungen im Ruhrgebiet. - Bergbauwissenschaften, 11, 121 - 140 (1964).

ARTOPOULOS, St. G.: Zur Erfassung von Gesteinstrennflächen im Gelände mit Hilfe eines Reduktionstachymeters (auf griechisch). - Bull. Geol. Soc. Greece, 12, 1 - 30 (1974).

BANKWITZ, P.: Über Klüfte I. Beobachtungen im Thüringischen Schiefergebirge. - Geologie, 14, 241 - 253 (1965a).

BANKWITZ, P.: Über Klüfte II. Die Bildung der Kluftfläche und eine Systematik ihrer Strukturen. - Geologie, 15, 896 - 941 (1966).

BOCK, H.: Über die Abhängigkeit von Kluftabständen und Schichtmächtigkeiten. - N. Jb. Geol. Paläont. Mh., Jg. 1971, H. 9, 517 - 531 (1971).

BOCK, H.: Zur Mechanik der Kluftentstehung in Sedimentgesteinen. - Veröff. Inst. Bodenmech. Felsmech. Univ. Karlsruhe, 53 (1972).

BRAUN, F. J.: Die "grünen" und "blauen" Werksteinbänke von Anröchte und Klieve aus den Scaphitenschichten der Turonserie. - Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., 7, 479 - 486 (1964).

CLAR, E.: Zur Darstellung der Klüftigkeit von Felsaufschlüssen. - Geol. Bauwes., 11, 1 - 3 (1939).

CLOOS, H.: Einführung in die Geologie. - Berlin (Borntraeger), 1936.

DALE, T. N. und GREGORY, H. E.: The granits of Connecticut. - US. Geol. Survey Bull., 484, 1 - 137, (1911).

DA SILVEIRA, A. F., RODRIGUES, F. P., GROSSMANN, N.F. und DE MELLO MENDES, F.: Quantitative characterization of the geometric parameter of jointing in rock masses. - Proceed. 1st. Congr. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, Vol. I, 225 - 233 (1966).

DEUTSCHE BUNDESBAHN: Richtlinien für Bauarbeiten an Eisenbahntunneln (Tunnelbaurichtlinien). - Stand: 1. 1.1976.

FECKER, E.: Tektonische Beobachtungen am Westrand des Rheingrabens bei Neustadt a. d. Weinstraße. - Oberrhein. Geol. Abh., 20, 15 - 20 (1971).

GRAMBERG, J.: Axial cleavage fracturing, a significant process in mining and geology. - Eng. Geol, 1, 31 - 72 (1965).

GRAMBERG, J.: Theory on the occurence of various typer of vertical and sub-vertical joints in the earth crust. - Proceed. 1st. Congr. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, Vol. I, 443 - 450 (1966).

GRAMBERG, J.: Bruchbildung, Bewegungen und Spannungen um eine Abbaustrecke bei einseitigem Abbau. - Sitz.-Ber. Informationstagung: "Gebirgsdruck und Grubenausbau" der Kommission der europäischen Gemeinschaften, Luxemburg, 1 - 100 (1969).

HAHNE, H.: Lehrreiche geologische Aufschlüsse im Ruhrrevier. - Essen (Glückauf), 1958.

HEITFELD, K.H. und HESSE, K.-H.: Engineering geological aspects on the lining of caverns in sedimentary rocks. - Proceed. 2nd Congr. Int. Assoc. Eng. Geol., Sao Paulo, Vol. 2, VII - 10 (1974).

HERGET, G.: Shear anisotropy in a bedded pyritic shale and a siliceous dolomite. - Rock Mech., 2, 93 - 100 (1970).

HESSE, K.-H.: Ermittlung der Kluftflächengröße und des räumlichen Durchtrennungsgrades aus der ingenieurgeologischen Kartierung. - Diskussionsbemerkung 1. Nat. Tagung über Felshohlraumbauten, Essen (Deutsche Ges. Erd- u. Grundbau), 149 - 151 (1974).

HILL, P. A.: Curviplanar (radial, bow-tie, festoon) and concentric jointing in jurassic dolerite, Mersey Bluff, Tasmania. - J. Geol., 73, 255 - 270 (1965).

HODGSON, R. A.: Regional study of jointing in Comb Ridge - Navajo Mountain area, Arizona and Utah. - Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., 45, 1 - 38 (1961a).

HODGSON, R. A.: Classification of structures on joint surfaces. - J. Amer. Sci., 259, 493 - 502 (1961b).

HOEPPENER, R.: Probleme der mechanischen Deutung tektonischer Gefüge. - Rock Mech., Suppl. 4, 11 - 20 (1975).

JENNINGS, J. E.: A mathematical theory for the calculation of the stability of slopes in open cast mines. - Proceed. Symp. Planning Open Pit Mines, Johannesburg, 87 - 102, Balkema (S. Afr. Inst. Min. Met.), 1970.

JENNINGS, J. E.: An approach to the stability of rock slopes based on the theory of limiting equilibrium with a material exhibiting anisotropic shear strength. - Proceed. 13th Symp. Rock Mech., Univ. Illinois, 269 - 302, Amer. Soc. of Civil Eng. (1972).

JENNINGS, J. E. und ROBERTSON, A. MAcG.: The stability of slopes cut into natural rock. - Proceed. VII. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Mexico, 585 - 590 (1969).

JOHN, K. W.: An approach to rock mechanics. - Proceed. ASCE, J. Soil Mech. Found. Eng., 88, 1 - 30 (1962).

JOHN, K. W.: Festigkeit und Verformbarkeit von druckfesten, regelmäßig gefügten Diskontinuen. - Veröff. Inst. Bodenmech. Felsmech. Univ. Karlsruhe, 37 (1969).

JOHN, K. W.: Properties of rock masses in research and engineering practice. - Proceed. 3rd. Int. Congr. Soc. Rock Mech., Denver, Vol. I, 173 - 176 (1974).

KENDALL, P. E. und BRIGGS, H.: The formation of rock joints and the cleat in coal. - Proceed. Roy. Soc. Edinburgh, 53, 164 - 187 (1933).

KIRSCHKE, D.: Die Programmiersprache GELI 1 in Fortran IV-Version, für die Rechenanlage IBM/360. - Clausth. tekt. Hefe, 10, 133 - 138, (1970).

LAJTAI, E. Z.: Shear strength of weakness planes in rock. - Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 6, 499 - 515 (1969).

MAHTAB, M. A., BOLSTAD, D. D. und KENDORSKI, F. S.: Analysis of the geometry of fractures in San Manuel Copper Mine, Arizona. - U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines R. I. 7715, 1 - 24 (1973).

MONAHAN, C. J.: Discussion to K.W. JOHN: "An approach to rock mechanics". - Proceed. ASCE, J. Soil Mech. Found. Eng., 88, 306 - 307 (1963).

MÜLLER, K.: Zur Definition des Durchtrennungsgrades. - Rock Mech., Suppl., 3, 17 - 29 (1974).

MÜLLER, L.: Geomechanische Auswertung gefügekundlicher Details. - Geol. Bauwes. , 24, 4 - 21 (1958a).

MÜLLER, L.: Der Felsbau, Bd. 1. - Stuttgart (Enke), 1963.

MÜLLER, L.: Application of rock mechanics in the design of rock slopes. - Proceed. Int. Conf.: "State of stress in the Earth's Crust", New York, 575 - 598, Elsevier (1964).

MÜLLER, L.: Der progressive Bruch in geklüfteten Medien. - Proceed. 1st. Congr. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, Vol. I. 679 - 686 (1966).

MÜLLER, L.: Diskussionsbemerkung. - Rock Mech., 2, 61 - 64 (1970).

MÜLLER, L. und GÖTZ, P. H.: In-situ measurements in jointed rock masses as a means to study their failure behavior. - Sitz.-Ber. 3. Int. Tagung über den Bruch, München, IX - 423 (1973).

MÜLLER, L. und PACHER, F.: Modellversuche zur Klärung der Bruchgefahr geklüfteter Medien. - Felsmech. Ing.-Geol. Suppl., 2, 7 - 24 (1965).

MÜLLER, L., TESS, C., FECKER, E. und MÜLLER, K.: Kriterien zur Erkennung der Bruchgefahr geklüfteter Medien - Ein Versuch. - Rock Mech., Suppl., 2, 71 - 92 (1973).

NICKELSEN, R. P. und HOUGH, N. S.: Jointing in the Appalachian Plateau of Pennsylvania. - Geol. Soc. Amer. Bull., 78, 609 - 630 (1967).

PACHER, F.: Kennziffern des Flächengefüges. - Geol. Bauwes., 24, 223 - 227 (1959).

PARKER, J. M.: Regional systematic jointing in slightly deformed sedimentary rocks . - Geol. Soc. Amer. Bull., 53, 381 - 408 (1942).

PIROGOV, I. A.: The study of tectonic ruptures and jointing of rocks and evaluation theme as foundations of high concrete dams. - Symp. Int. Soc. Rock Mech., Nancy, I - 16 (1971).

PITEAU, D. R.: Engineering geology contributions to the study of stability of slopes in rock with particular reference to De Beers Mine. - Ph. D. Thesis, Univ. Witwatersrand (1970a).

PITEAU, D. R.: Geological factors significant to the stability of slopes cut in rock. - Proceed. Symp. Planning Open Pit Mines, Johannesburg, 33 - 53, Balkema (S. Afr. Inst. Min. Met.), 1970b.

PITEAU, D. R.: Engineering geology considerations and approach in assessing the stability of rock slopes. - Bull. Assoc. Eng. Geol., V. IX, 301 - 320 (1972).

PITEAU, D. R.: Characterizing and extrapolating rock joint properties in engineering practice. - Rock Mech., Suppl., 2, 5 - 31 (1973).

PRICE, N. J.: Fault and joint development in brittle and semi-brittle rock. - Oxford (Pergamon Press), 1966.

RAGATT, H. G.: Markings on joint surfaces in Angelsea, Victoria. - Am. Assoc. Petroleum Geol. Bull., 38, 1808 - 1810 (1954).

REIK, G.: Tektonische Entlastungsphase und Entwicklung des Kluft- und Mikrogefüges. - Festschrift L. Müller-Salzburg zum 65. Geburtstag, Karlsruhe, 113 - 126 (1974).

RENGERS, N.: Unebenheit und Reibungswiderstand von Gesteinstrennflächen. - Veröff. Inst. Bodenmech. Felsmech. Univ. Karlsruhe, 47 (1971).

RICHARDS, L. R.: Classification and Weathering of near-surface jointed Rock. - M. Sc. Thesis, Imp. Coll. London (1972).

RICHTER, D.: Ruhrgebiet und Bergisches Land - zwischen Ruhr und Wupper. - Sammlung geol. Führer, 55, (Borntraeger), 1971.

ROBERTS, J. C.: Feather-fracture, and the mechanics of rock-jointing. - J. Am. Sci., 259, 481 - 492 (1961).

ROBERTSON, A. MAcG.: The interpretation of geological factors for use in slope stability. - Proceed. Symp. Planning Open Pit Mines, Johannesburg, 55 - 71, Balkema (S. Afr. Inst. Min. Met.), 1970.

ROBERTSON, A. MAcG. und PITEAU, D. R.: The determination of joint populations and their significance for tunnel stability. - Proceed. Conf. "The Technology and Potential of Tunnelling", S. Afr. Inst. Min. Met. (1970).

RODATZ, W.: Durchtrennungsgrad-Stichwort in: Wörterbuch der Felsmechanik und Ingenieurgeologie, Essen (Deutsche Ges. f. Erd- und Grundbau), 1975.

SANDER, B.: Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper. - Wien (Springer), 1948.

SECOND DRAFT OF ISRM WORKING PARTY (CATEGORIES I 9 AND I 10): Suggested methods for the description of rock masses, joints and discontinuities (in Preparation). Stand: August 1975.

SECOR, D. T.: Role of fluid pressure in jointing. - J. Amer. Sci., 263, 633 - 646 (1965).

STEFFEN, O. K. W. und JENNINGS, J. E.: Definition of design joints for two-dimensional rock-slope analyses. - Proceed. 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech., Denver, V. II-B, 827 - 832 (1974).

TERZAGHI, K.: Stability of slopes in hard unweathered rock. - Geotechnique, 12, 251 - 270 (1962).

WERNER, H. U.: Der Einfluß des ebenen Durchtrennungsgrades von Gefügeflächen auf die Standfestigkeit von Felsböschungen . - Proceed. 2nd Congr. Int. Soc. Rock Mech., Beograd, Vol. 3, 303 - 309 (1970).

WOODWORTH, J. B.: Some features of joints. Science, 2, 903 - 904 (1895).

WOODWORTH, J. B.: On the fracture system of joints, with remarks on certain great features. Boston Soc. Nat. History Proc., 27, 163 - 184 (1896).

Anstelle der vollständigen Anhänge A und B sind hier jeweils nur ihre Inhaltsverzeichnisse beigefügt. An den Anhängen näher Interessierte mögen sich bitte direkt an den Verfasser wenden.

ANHANG A - MATHEMATISCHE GRUNDLAGEN UND PROGRAMMPROTOKOLLE ZUR BERECHNUNG DER MAKRORAUHIGKEIT

A 1 RECHENANLAGE TR/440 DER RUHR-UNIVERSITÄT

A 1.1 Mathematische Grundlagen

A 1.1.1 "Ursprüngliche" bzw. "alte" räumliche Koordinaten der Meßpunkte

A 1.1.2 "Teil- und Gesamtausgleichsebene" und "neue" räumliche Koordinaten der Meßpunkte

A 1.1.3 "Ebene" Koordinaten der Meßpunkte

A 1.1.4 Raumstellung von Flächen

A 1.1.5 Flächeninhalt

A 1.1.6 Abstände der Kluftflächen von ihrer Gesamtausgleichsebene ("GAE")

A 1.2 Programmprotokoll

A 2 PROGRAMMIERBARER TASCHENRECHNER "HEWLETT-PACKARD HP-65"

A 2.1 Vorbemerkungen

A 2.2 Mathematische Grundlagen

A 2.2.1 "Räumliche Koordinaten"

A 2.2.2 "Normalenvektor"

A 2.2.3 "Raumstellung"

A 2.2.4 "Ebene Koordinaten"

A 2.3 Programmprotokoll

ANHANG B - AUSWERTUNG DER DURCHGEFÜHRTEN GELÄNDEAUFNAHMEN UND BESTIMMUNG DER MAKRORAUHIGKEITSKENNWERTE DER UNTERSUCHTEN AUFSCHLUßOBERFLÄCHEN

B 1 VORBEMERKUNGEN

B 2 BEISPIEL A

B 3 BEISPIEL B

L E B E N S L A U F

1946	Geboren in Athen, Griechenland, am 23. August
1952 - 1958	Volksschule in Moschaton, Athen
1958 - 1964	Naturwissenschaftliches Gymnasium in Moschaton, Athen
1964 - 1969	Studium der Geologie an der Universität zu Athen. Diplomprüfung: 17. 6.1969
1969 - 1971	Ab Juni 1969 Tätigkeit als Assistent m.d.V.b. am Lehrstuhl für Geologie und Paläontologie der Universität Athen; zugleich Wehrdienst in der geologisch-geodätischen Abteilung des griechischen Heeres.
1971	Ab 1.10. studentische Hilfskraft, seit 15.1.1972 wissenschaftliche Hilfskraft am Lehrstuhl Geologie III - Geotechnik des Institutes für Geologie und Paläontologie der Ruhr-Universität Bochum.

Fotodruck: Mainz, Aachen, Malteserstraße 9, am Ponttor, Telefon (02 41) 2 73 05
Betrieb: Neupforte 13, Nähe Markt